

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria de l'Energia

**DIMENSIONAT ENERGÈTIC I DESENVOLUPAMENT D'UN
SISTEMA PORTÀTIL DE CÀRREGA PER A DRONS
MITJANÇANT ENERGIES RENOVABLES**



Memòria i Annexos

Autor:	Juan Manuel López López
Director:	Antoni Grau Saldes
Co-Director:	Edmundo Guerra Paradas
Convocatòria:	Octubre 2017

1. Resum

Aquest treball és part d'un projecte que pretén dissenyar i implementar una plataforma portàtil per a la càrrega de drons amb energia renovable. Aquest sistema té l'objectiu d'alimentar les bateries que equiperen els drons de forma aïllada i independent sense necessitat d'una connexió a la xarxa elèctrica. Es pretén llavors solucionar, d'una forma sostenible, el problema de la poca autonomia de les bateries d'aquest tipus d'equips (uns 15-20 minuts segons l'ús) amb aquest sistema que compta amb un emmagatzematge propi per a quan la font d'energia (llum solar o vent) és insuficient o absent.

No s'ha suposat una tasca concreta que hagi de realitzar el dron, inicialment la idea era que realitzés feines de tipus reparació/supervisió de grans instal·lacions on l'accessibilitat sigui difícil o en moments d'emergència on la perillositat per les persones sigui elevada. Amb aquest principi em pensat que el sistema també pot ser útil per molts altres tipus de treballs i que les necessitats energètiques a cada cas poden variar, és per això que no ens hem centrat en una idea fixa.

El projecte està compost per diferents treballs, cadascun s'encarrega d'una part del sistema. En aquest treball es tracta el dimensionat de la part de captació d'energia renovable. Per aconseguir aquest objectiu s'ha necessitat saber les característiques del model de dron emprat junt amb la seva bateria, el model de panell solar i el model d'aerogenerador que s'utilitzarien, a més d'haver fet servir documentació diversa i software que s'especifica al llarg de la memòria.

Darrera modificació d'aquest document: Setembre de 2017

Resumen

Este trabajo es parte de un proyecto que pretende diseñar e implementar una plataforma portátil para la carga de drones con energía renovable. Este sistema tiene el objetivo de alimentar las baterías que equipan los drones de forma aislada e independiente sin necesidad de una conexión a la red eléctrica. Se pretende entonces solucionar, de una forma sostenible, el problema de la poca autonomía de las baterías de este tipo de equipos (unos 15-20 minutos según el uso) con este sistema que cuenta con un almacenamiento propio para cuando la fuente de energía (luz solar o viento) es insuficiente o ausente.

No se ha supuesto una tarea concreta que deba realizar el dron, inicialmente la idea era que realizara trabajos de tipo reparación/supervisión de grandes instalaciones donde la accesibilidad sea dificultosa o en momentos de emergencia donde la peligrosidad para las personas sea elevada. Con este principio hemos pensado que el sistema también puede ser útil para muchos otros tipos de trabajos y que las necesidades energéticas cada caso pueden variar, por lo que no nos hemos centrado en una idea fija.

El proyecto está compuesto por diferentes trabajos, cada uno se encarga de una parte del sistema. En este trabajo se trata el dimensionamiento de la parte de captación de energía renovable. Para conseguir este objetivo se ha necesitado saber las características del modelo de dron empleado junto con su batería, el modelo de panel solar y el modelo de aerogenerador que se utilizarían, además de haber usado documentación diversa y software que especifica a lo largo de la memoria.

Última modificación de este documento: Septiembre de 2017

Abstract

This work is part of a project that aims to design and implement a portable platform for the loading of drones with renewable energy. This system aims to power the batteries that equip the drones in isolation and independently without the need for a connection to the electrical grid. It is then intended to solve, in a sustainable way, the problem of the low battery life of this type of equipment (about 15-20 minutes depending on use) with this system that has its own storage for supply when the power source (sunlight or wind) isn't enough or absent.

No specific task has been assigned to the drone, the initial idea was that it would do jobs of repair / supervision of large facilities where accessibility is difficult or emergency cases where the danger for people would be high. With this principle it is thought that the system can also be useful for many other types of work and that the energy needs in each case may vary, which is why we have not focused on a fixed idea.

The project consists of different works, each one in charge of a part of the system. This paper deals with the dimensioning of the part of the capture of renewable energy. To achieve this goal, it is necessary to know the characteristics of the drone model used with its battery, the solar panel model and the model of wind turbine to be used, as well as having used diverse documentation and software that it is specified throughout the memory.

Last modified on this document: September 2017



Agraïments

Agraeixo al tutor d'aquest treball, Antoni Grau i Saldes, i al codirector, Edmundo Guerra Paradas, totes les aportacions en forma d'ajuts, consells, dades i guies que he rebut per part seva durant la realització d'aquest treball. Sense ells no hagués estat possible la realització del mateix.





Índex

1. RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRAÏMENTS	V
1. PREFACI	1
1.1. Origen del treball	1
1.2. Motivació	1
1.3. Requeriments previs	1
2. INTRODUCCIÓ	3
2.1. Objectius del treball	3
2.2. Abast del treball.....	3
3. TEORIA I CONCEPTES SOBRE DIMENSIONAT I RECURSOS	5
3.1. L'Energia solar fotovoltaica	5
Taules de radiació solar	6
El piranòmetre	7
3.2. L'Energia eòlica	12
Obtenció de la funció de densitat de probabilitat de Weibull	13
4. Càlcul de les necessitats energètiques	15
4.1. Bateria incorporada als drons (LIPO)	15
4.1.1. Característiques de la bateria emprada.....	15
4.1.2. Profunditat de descàrrega.....	16
4.2. Pèrdues rere la captació i l'emmagatzematge	17
4.3. Tria de paràmetres per l'obtenció de la demanda energètica	19
5. Càlcul del dimensionat energètic	21
5.1. Mode solar	21
5.1.1. PVGIS	21
5.1.2. Utilització de les dades de PVGIS i càlcul de la producció energètica	24
5.1.3. Model de panell fotovoltaic proposat	27
5.2. Mode eòlic	28
5.2.1. Windographer.....	29

5.2.2.	Obtenció de les corbes Weibull	32
5.2.3.	Aerogenerador proposat, corba de potència i càlcul de la producció energètica	34
5.3.	Selecció de tecnologia i resultat dels dimensionats	36
5.3.1.	Plantejament inicial i procés per al dimensionat	36
5.3.2.	Dimensionat per a un cas concret	43
6.	SEGUIMENT SOLAR	49
6.1.	Moviment Sol-Terra i obtenció de la trajectòria solar	49
6.1.1.	Declinació solar	51
6.1.2.	Moviment del sol relatiu a la Terra	52
6.2.	Tria de servomotors	53
6.3.	Algoritme	55
6.3.1.	Seguiment solar amb sensors lumínics o potència aportada	55
6.3.2.	Seguiment solar de forma analítica	56
7.	ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL	58
8.	PRESSUPOST	61
8.1.	Cost dels components i materials	61
8.2.	Altres costos	61
	CONCLUSIONS	62
	BIBLIOGRAFIA	65
	ANNEX A	67
	Algoritme de seguiment solar en ARDUINO	67
	ANNEX B	74
	Fitxes tècniques i dades de components	74

1. Prefaci

1.1. Origen del treball

En els darrers temps els drons han esdevingut una tecnologia de Vanguardia i molt mediàtica i cada cop més podem observar com es plantegen més possibles funcions i tasques per aquests nous vehicles no tripulats, tant és així que s'ha arribat a proposar l'ús d'aquest tipus de tecnologia per part d'una empresa com Amazon a l'hora de repartir mercaderia o per part de cadenes de restaurants a l'hora de portar comandes. Aquests dispositius fa anys que existeixen i tenen un origen militar, és per això que de primeres sigui més fàcil veure un futur pròxim on les labors que duen a terme siguin del tipus vigilància o exploració, però cada cop més és factible pensar que aquesta tecnologia s'introduirà a la quotidianitat de la societat per fer tasques de tota mena.

1.2. Motivació

Quan es barregen dos problemes com són la poca autonomia de les bateries que utilitzen els drons que se'ns proposen en aquest projecte i la necessitat d'accedir a zones aïllades i extenses on la connexió a la xarxa no és possible sorgeix aquesta idea de crear un sistema de fàcil mobilitat capaç d'obtenir l'energia necessària de forma independent i neta.

1.3. Requeriments previs

Els requeriments previs per desenvolupar aquest sistema de càrrega de drons amb energia renovable són coneixements d'Energies renovables i d'electrònica, documentació diversa sobre aquests temes, propostes de models que trobem al mercat que s'utilitzaran i alguns softwares.

2. Introducció

El projecte de disseny i implementació d'aquesta plataforma portàtil es compon del disseny mecànic i tria de materials de l'estructura, disseny de l'electrònica, el carregador balancejat per les bateries i el dimensionat energètic. Salta a la vista que és un projecte extens que supera en extensió la d'un TFG i per tant cal assignar les diferents parts a diferents estudiants segons la seva modalitat d'estudis.

2.1. Objectius del treball

En aquest treball es pretén trobar solució al dimensionat energètic i a la tria de la font d'energia renovable que s'utilitzarà, així com el dimensionat de l'emmagatzematge. Per assolir aquest objectiu cal fixar els models de panells solars, aerogeneradors i bateries que s'usaran així com un objectiu de necessitats energètiques per poder acotar la mida d'un possible sistema que usi aquesta tecnologia. Un cop establertes totes aquestes pautes, a base d'emprar certes bases de dades climatològiques i càlculs amb les característiques tècniques dels dispositius es dona forma al sistema.

2.2. Abast del treball

Com s'ha mencionat anteriorment el projecte consta de diverses parts i el fet de comptar amb el desenvolupament del sistema electrònic de potència, el carregador balancejat i l'estructura per part d'altres companys podria servir per acotar d'alguna manera el desenvolupament d'aquesta part de dimensionat, però vist la quantitat de diferents casos en que es poden emprar aquests sistemes i la diversitat de les tasques que podrien fer aquests vehicles no tripulats en el futur s'ha triat no acotar tant aquesta part per tal de trobar les diferents solucions en funció de les necessitats.

3. Teoria i conceptes sobre dimensionat i recursos

Inicialment, abans de començar amb el dimensionat, cal fixar certs conceptes i explicar el funcionament dels dos tipus de fonts d'energia tractades (solar i eòlica) entre les quals triarem la més adient. Ha calgut una recerca per tal d'obtenir dades de radiació i vent necessàries per calcular la dimensió, cosa de la qual parlarem més endavant, i un coneixement d'aquest tipus d'instal·lació.

3.1. L'Energia solar fotovoltaica

La constant solar, amb valor 1.366 W/m^2 , és la potència mitjana de radiació solar incident per unitat de superfície en un plànol tangent a la capa més externa de l'atmosfera terrestre. Varia en un $\pm 3 \%$ segons el punt de l'òrbita on es troba la terra. Des del moment en que la radiació solar comença a travessar l'atmosfera fins que arriba al punt de la superfície terrestre en que estem interessats hi ha una sèrie d'efectes i processos que fan disminuir la potencia que arriba. La latitud, la longitud, la inclinació de l'eix terrestre i el moment de l'any en que ens trobem influeix en la quantitat d'aire atmosfèric que ha de travessar la llum solar, és a dir amb quanta més inclinació arribi la llum a la superfície terrestre, més gruix d'aire haurà travessat. A més l'angle d'incidència també afecta directament a la potència per unitat de superfície que arriba al punt concret.

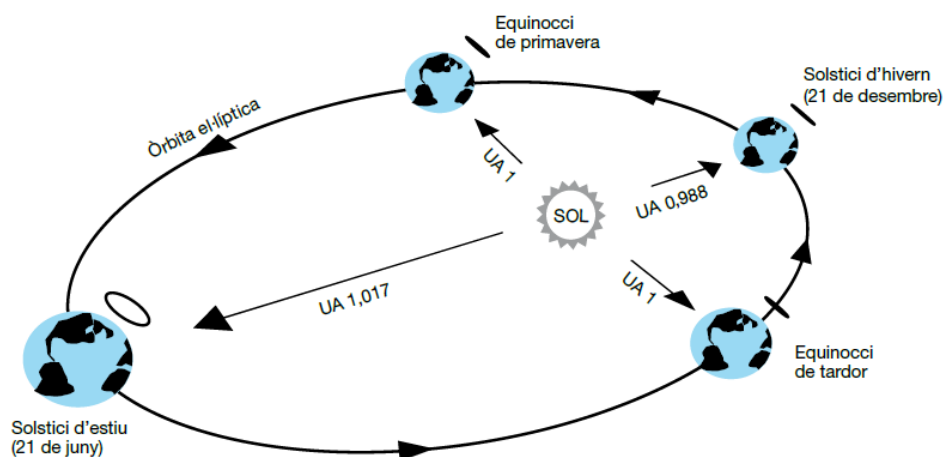


Figura 3.1. Esquema de l'Òrbita terrestre on UA= 149.600.000 km (Font: Energia Solar Fotovoltaica, Col·lecció Quadern Pràctic N°4; Institut Català d'Energia)

A part del comentat, en el moment en el que la radiació és travessant l'atmosfera, hi ha un seguit de processos que també afecten, hi ha gasos, vapor d'aigua i partícules en suspensió que reflecteixen, absorbeixen i transmeten (provoquen canvis de direcció). Per últim, la climatologia és el que més afecta pel que fa aquest tipus de fets, un cel ennuvolat actua com a potent filtre i afecta a la radiació directa de manera molt considerable.

	Radiació global (W/m²)	Percentatge de difusa (%)
Cel clar	750 - 1.000	10 - 20
Parcialment núvol	200 - 500	20 - 90
Tapat	50 - 150	90 - 100

Taula 3.1. Influència dels núvols a la radiació solar (Font: Energia Solar Fotovoltaica, Col·lecció Quadern Pràctic N°4; Institut Català d'Energia)

Tot plegat provoca que gran part de l'energia es perdi i no s'aprofita tota i aquestes pèrdues no afecten només a la quantitat sinó també a la composició (diferents longituds d'ona es veuen afectades de diferent forma).

És possible, coneixent les coordenades d'un punt de la terra i la dinàmica del moviment relatiu al llarg de l'any i els dies entre terra i Sol, mitjançant càlculs trigonomètrics, calcular la irradiància en aquest punt. A partir d'aquests càlculs es pot extreure amb força exactitud la irradiància amb cel clar ideal, però a la realitat el cas ideal es dona pocs cops i la climatologia és més difícil de preveure. [1]

Taules de radiació solar

És per això que per al càlcul d'instal·lacions solars no s'utilitza normalment un mètode on es tingui en compte la radiació solar instantània (irradiància) sinó que s'utilitzen mètodes com les taules de radiació. En aquestes taules podem trobar informació de radiació mitjana per períodes que ens permet calcular l'energia que obtindrem durant aquests de forma més directa. La informació que trobem en aquestes taules no és fàcil d'obtenir, cal prendre dades durant llargs períodes de temps (10 anys o més) de manera precisa i en cas de voler dades de zones properes on s'han pres les dades inicials cal usar correlacions matemàtiques, també necessàries per calcular radiació a diferents inclinacions i orientacions de panells estàtics. La informació s'extreu a partir d'uns aparells anomenats piranòmetres i amb el recolzament de satèl·lits i algorismes i softwares.

El més habitual és trobar taules on; per mes, orientació i inclinació, se'ns dona la quantitat d'energia solar incident al llarg d'un dia en 1 m^2 ($\text{MJ}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$ o $\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$) i així coneixent les característiques tècniques i l'eficiència dels panells solars que emprarem a la nostra instal·lació solar, fent una bona estimació i coneixent les necessitats energètiques del sistema, podem començar a dimensionar.

Hora Solar Pic (HSP)

S'acostuma a treballar amb hores solars pic, un valor que expressa les hores de llum solar al dia amb una intensitat fixa de 1.000 W/m^2 que produirien la energia equivalent que incidiria el dia mitjà escollit. Per exemple si en un dia la radiació mitjana és de $10 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{dia})$, el que equivaldria a 2,78 kWh o el que és el mateix l'energia incident durant 2,78 hores si la irradiància fos de 1000 W/m^2 , llavors les HSP en aquest cas són 2,78.

Aquesta forma de treballar es deu a que els fabricants de panells fotovoltaics expressen la potència d'aquests en termes de watts pic en condicions d'irradiància de 1000 W/m^2 .

El piranòmetre

Un piranòmetre (també anomenat solarímetre i actinòmetre) és un instrument meteorològic utilitzat per mesurar de manera molt precisa la radiació solar incident sobre la superfície de la Terra. Es tracta d'un sensor dissenyat per mesurar la densitat del flux de radiació solar (kW/m^2) provinent des de totes les direccions possibles. acoblats a un ordinador, acumulen aquestes dades en el transcurs del temps de presa de mesures. [8]



Figura 3.2. Piranòmetre fotovoltaic (Font: sinovoltaics.com)

Piranòmetre tèrmic

Està compost per una pila termoelèctrica pintada amb un vernís negre, per absorbir la radiació, continguda en una allotjament format per dos cúpules de vidre. La pila termoelèctrica està constituïda per un conjunt de termoparells col·locats horitzontalment amb extrems soldats a una

placa de llautó massissa. El flux de calor originat per la radiació es transmet a la termopila i aquest genera una tensió elèctrica proporcional a la diferència de temperatura entre els metalls dels termoparells.

Per mesurar la radiació difusa cal tapar el sensor de radiació directa mitjançant una pantalla para-sol, mesurant la irradiància solar difusa.

Piranòmetre fotovoltaic

L'altre tipus de piranòmetres és el fotovoltaic. En aquests el principi de funcionament no és tèrmic sinó que té com a principi l'efecte fotoelèctric i són més sensibles a petites irregularitats i canvis gràcies a no tenir la inèrcia tèrmica que sí que tenen els tèrmics. La radiació incideix sobre un fotodíode que és capaç de diferenciar l'espectre solar per la freqüència de l'ona electromagnètica, i d'aquesta manera, mitjançant la lectura de voltatge, conèixer les dades de radiació.

En aquest tipus de piranòmetres és possible usar filtres de bandes concretes de l'espectre solar, per mitjà d'un vidre tenyit amb el filtre desitjat.

Panell solar

Un panell solar és la unió de moltes cèl·lules solars, petites plaques fetes habitualment de silici cristal·lí que, gràcies al que s'anomena efecte fotovoltaic o fotoelèctric, converteix la llum solar en electricitat. Connectades en sèrie poden donar voltatges útils i amb relativament poc material donen bones potències. Segons la cristal·lització poden ser monocristal·lines (un únic cristall de silici), policristal·lines (composades per petites partícules cristal·litzades) o amorfes (silici sense cristal·litzar). La qualitat, eficiència i per tant el cost de producció i el preu augmenten amb la grandària dels cristalls.

Material	Rendiment bàsic
Silici monocristal·lí	14 – 17%
Silici policristal·lí	10 – 14%
Silici amorf	4 – 8%

Taula 3.2. Eficiència fotovoltaica segons cristal·lització del silici (Font: Energia Solar Fotovoltaica, Col·lecció Quadern Pràctic N°4; Institut Català d'Energia)

El funcionament d'aquestes és possible gràcies a les característiques dels materials semiconductors, capaços de canviar el seu comportament d'avant l'electricitat depenent de si són o no excitats per una font externa com per exemple la llum solar. La cèl·lula està composta principalment per dues

làmines de silici, una amb defecte d'electrons, anomenada zona "p" o positiva, ànode o receptor que normalment s'aconsegueix afegint al silici pur una petita part de Bor (B) que té 3 electrons de valència i una altra amb excés d'electrons, anomenada "n" o negativa, càtode o emissor que pel general s'obté afegint fòsfor (P) amb 5 electrons en la darrera òrbita.

Aquesta diferència de càrrega elèctrica en el material produeix un camp elèctric que empenya els electrons a sortir de la cèl·lula per la superfície de la capa N, això provoca un corrent elèctric. La cèl·lula també incorpora uns contactes elèctrics de forma ramificada que canalitzen l'energia produïda quan incideix energia solar. Aquests contactes estan a la cara on incideix la llum solar i n'hi ha dos de principals unitats per les ramificacions anomenades per a recaptar millor els electrons a la superfície de la cèl·lula aconseguint també combinar un bon contacte elèctric, baixa resistivitat i fer l'ombra mínima per que els fotons arribin al semiconductor. A la part posterior, aquests contactes formen una trama atapeïda o, fins i tot, una làmina contínua per reduir la resistència interna. [9]



Figura 3.3. Cèl·lula fotovoltaica (Font: sinovoltaics.com)

Quan un fotó amb energia superior a la de valència impacta contra el material semiconductor en aquest es crea un parell electró-forat i degut a la diferencia de potencial existent a la unió entre els dos semiconductors, anomenada unió p-n, ambdós portadors de càrrega (electró i forat) es separen abans de tornar a recombinar-se. Si els borns de la cèl·lula (o del panell, conjunt de cèl·lules) es connecten a una càrrega a l'hora que la llum solar hi incideix, en aquesta es genera una diferencia de potencial que crea un corrent que hi circula pel sistema.

Els panells solar tenen una sèrie de característiques de funcionament que normalment estan referides al seu comportament en unes condicions Standard: 1000W/m^2 d'irradiància i $25\text{ }^\circ\text{C}$ amb un espectre solar corresponent a 1.5 A.M. (travessar 1.5 cops el gruix d'aire entre la capa més exterior

de l'atmosfera i l'escorça terrestre en perpendicular al pla tangent a qualsevol de les dues superfícies). Aquestes característiques són les següents:

Corrent de curtcircuit (ICC)

Correspon al corrent que es genera quan es curtcircuiten els borns del panell, és un corrent suportable pels materials que formen el panell. El valor correspon al valor de tall a l'eix de les ordenades a la corba I-V, és a dir el corrent quant el voltatge és 0. Quan els borns es curtcircuiten el voltatge cau a 0 i els portadors de càrrega no es recombinen, això provoca aquest corrent, que és el corrent màxim.

Voltatge en circuit obert (VCO)

Si no hi ha cap circulació de portadors de càrrega és 0, els portadors es recombinen a la mateixa cèl·lula i la unió p-n s'eixampla creant un valor característic de voltatge, el VCO, que correspon al màxim voltatge i al valor de tall de l'eix d'abscisses de la corba I-V.

El punt màxim de potència

Per a cada valor de voltatge correspon un de corrent i com sabem la potència és el producte entre ambdós valors, el punt on aquest producte és màxim és el punt de màxima potència. Els valors de voltatge i corrent en aquest punt són importants, són els valors que es busquen amb la utilització d'aparells reguladors de càrrega amb seguidor de punt de màxima potència (mppt) i amb els quals es treballa a l'hora de dimensionar. A continuació veiem ambdues corbes: la I-V i la de potència:

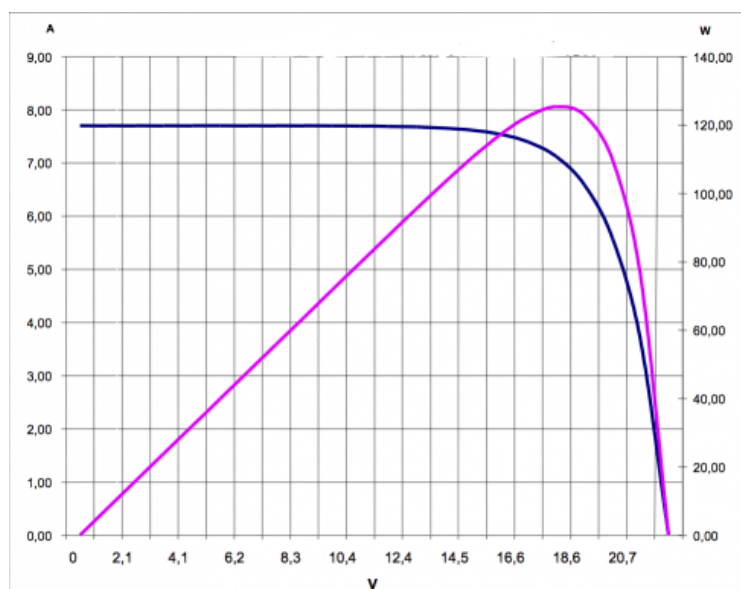


Figura 3.4. Corba I-V i de potència d'un mòdul solar (Font: wordpress.com)

Variacions en la irradiància i la temperatura

En gran part dels valors d'irradiància el corrent generat pel mòdul és directament proporcional a aquesta i es pot representar de la següent manera:

$$I = K \cdot I_{STC} \quad (\text{Eq. 1})$$

K és el nombre de vegades la irradiància Standard

I_{STC} és el corrent en les condicions Standard

El voltatge de circuit obert varia d'acord el logaritme neperià de K

A temperatures elevades el rendiment disminueix considerablement degut a que a pesar de que amb una major mobilitat de partícules i per tant menor energia de valència, la temperatura provoca un eixamplament de la zona d'unió P-N i això comporta una caiguda de voltatge en circuit obert d'uns - 2,3 mV/°C aproximadament.

3.2. L'Energia eòlica

El recurs eòlic és més difícil d'estimar ja que la forma en que apareix (velocitat, direcció...) és difícil de predir, sobretot en un punt concret, això és degut a que els factors que influeixen en aquest cas són molts més. Influeixen la rotació terrestre, les diferències de temperatura entre el lloc i els voltants, els obstacles propers, orografia i rugositat del terreny i fins i tot la posició de la lluna.

L'anemòmetre és l'aparell que mesura la velocitat del vent i s'utilitza per fer prediccions climatològiques a les estacions meteorològiques. N'hi ha de diversos tipus, dins del grup dels que mesuren velocitat directament podem trobar els de cassolotes semiesfèriques (gir amb eix vertical), amb hèlix d'eix horitzontal, làser (aprofita l'efecte doppler), sònics (ultrasons), filferro de tungstè (el filferro calent es refrigera en funció de la velocitat); per altra banda hi ha anemòmetres que mesuren la pressió que exerceix el vent sobre l'aparell i a través d'aquesta s'extreu la velocitat, per exemple l'anemòmetre de placa plana o el tub de pitot.

Mitjançant exhaustives mesures, recopilant-les i emmagatzemant-les per mitjà d'ordinadors podem obtenir bases de dades molt útils en l'estimació de la velocitat del vent i mitjançant mètodes estadístics perfeccionar aquestes estimacions.

Els fabricants d'aerogeneradors per a instal·lacions minieòliques ens aporten amb la fitxa tècnica del producte totes les característiques d'aquest. Per poder conèixer la potència generada per un aerogenerador, els fabricants proveeixen el que s'anomena la corba de potència: una corba que determina la potència produïda per l'aerogenerador en funció de la velocitat del vent.

Un cop posseïm dades de vent fiables, el que ens interessa és saber quina fracció de temps dins del període pel qual volem dimensionar tenim un interval de velocitats que ens interessin, així podem saber quina fracció del temps està treballant el nostre aerogenerador a cada punt de la corba de potència. Aquesta forma de representar la informació obtinguda de les dades de vent es diu corba Weibull.

La corba de Weibull és una corba que representa la freqüència amb la qual es repeteix una velocitat del vent en funció de la pròpia velocitat i s'obté amb l'aplicació de la distribució de probabilitat continua amb aquest mateix nom. Creuant la corba Weibull d'un període amb la corba de potència de l'aerogenerador que volem fer servir per a la nostra instal·lació s'obté la quantitat d'energia estimada que es produiria en aquest període descrit.

Quan tenim un registre de dades de vent extens, per obtenir la corba weibull cal seguir un procés matemàtic que ens permet calcular els paràmetres de la funció de distribució de la probabilitat i per tant extreure també la funció de densitat de la probabilitat amb la qual ja es podrà treballar.

Obtenció de la funció de densitat de probabilitat de Weibull

La funció de densitat de Weibull té la següent forma:

$$f(x; c, k) = \begin{cases} \frac{k}{c} \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^k} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (\text{Eq. 2})$$

On la k és el paràmetre de forma i c el paràmetre d'escala.

Quan agrupem una sèrie de dades de vent per freqüència en funció de la velocitat obtenim un histograma que s'ajusta a aquesta forma de corba, i quant més curts són els intervals emprats al l'eix de les abscisses més real és aquest ajust. De totes maneres no és trivial obtenir els paràmetres d'aquesta corba a partir d'aquest conjunt i per tant cal fer servir una altra tàctica: treballar amb la funció de distribució de la probabilitat i amb un histograma amb valors acumulats de freqüència. A continuació es mostra el procés. [5]

La funció de distribució de probabilitat és com segueix:

$$F(x; c, k) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^k} \quad (\text{Eq. 3})$$

Es pot arreglar aquesta funció de la següent manera:

$$\ln(1 - F(x)) = -\left(\frac{x}{c}\right)^k \quad (\text{Eq. 4})$$

$$\ln(-\ln(1 - F(x))) = \ln\left(\frac{x}{c}\right)^k \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\ln(-\ln(1 - F(x))) = k(\ln(x) - \ln(c)) \quad (\text{Eq. 6})$$

D'aquesta manera obtenim una equació en forma d'equació de la recta on:

$$y = \ln(-\ln(1 - F(x))) ; m = k ; x = \ln(x) ; b = -k\ln(c)$$

Si les nostres dades de freqüències de velocitat de vent les transformem a la forma acumulada obtindrem una sèrie de punts amb els quals, fent una regressió lineal, obtindrem uns paràmetres m i b de la recta amb els quals podrem calcular els paràmetres k i c que necessitem.

Per transformar les dades a freqüències acumulades només cal considerar que ara en comptes de freqüències de cada interval volem la suma d'aquestes de tots els intervals que van de zero a la velocitat de cadascun. És important remarcar que cal treballar amb freqüències relatives.

Una eina molt útil com és Excel ens permet ficar en un gràfic els diferents valors de freqüències acumulades respecte d'un valor mitjà de l'interval de velocitat, i mitjançant "agregar linea de tendència" del clic dret al gràfic i marcant l'opció "lineal" obtenim, de forma senzilla, la regressió lineal desitjada.

v(m/s)	f_{abs}	f_{rel}	f_{ac}	valor abscisses
0 - 1	0,165	0,01943005	0,01943005	0,5
1 - 2	0,741	0,0872586	0,10668865	1,5
2 - 3	1,096	0,12906265	0,2357513	2,5
3 - 4	1,473	0,17345737	0,40920867	3,5
4 - 5	1,073	0,12635422	0,53556288	4,5
5 - 6	0,811	0,09550165	0,63106453	5,5
6 - 7	0,782	0,09208667	0,7231512	6,5
7 - 8	0,776	0,09138012	0,81453132	7,5
8 - 9	0,622	0,07324541	0,88777673	8,5
9 - 10	0,388	0,04569006	0,93346679	9,5
10 - 11	0,273	0,0321479	0,9656147	10,5
11 - 12	0,098	0,01154027	0,97715497	11,5
12 - 13	0,051	0,00600565	0,98316062	12,5
13 - 14	0,069	0,00812529	0,99128592	13,5
14 - 15	0,046	0,00541686	0,99670278	14,5
15 - 16	0,028	0,00329722	1	15,5
total	8,492	1		

Taula 3.3. Exemple d'obtenció de freqüència acumulada (Font: Elaboració pròpia)

Un cop tenim els paràmetres de les nostres corbes weibull, mitjançant la funció DISTR.WEIBULL d'Excel podem construir aquestes i creuar-les amb les corbes de potència de l'aerogenerador que utilitzem.

4. Càlcul de les necessitats energètiques

Les necessitats energètiques del sistema estaran determinades en primer lloc per la quantitat de viatges que es desitgi que ha de fer el dron per un període de temps determinat, aquest paràmetre serà variable i es treballarà de forma que sigui flexible, és a dir es buscarà tenir un dimensionat amb varis resultats relatius a varis valors d'aquest paràmetre. Per una altra banda influeix també la capacitat i la profunditat de descàrrega de les bateries que usen els drons, així com el conjunt de pèrdues associades a aquestes i al conjunt del sistema, a continuació s'entra en detall en aquests temes.

4.1. Bateries incorporades als drons (LIPO)

Les bateries que incorpora el dron són bateries tipus LIPO, un tipus de bateries recarregables de polímer de Liti (LIPO és l'abreviatura) que en els últims anys s'ha vist àmpliament utilitzat i millorat a diverses aplicacions per a transports. En el cas de transports aeris ha tingut un ús eficaç i exitós.

Una sèrie de característiques que fan destacar aquest tipus de bateries son: Una alta taxa de descàrrega, una gran mal·leabilitat en relació a formes i grandària, capacitats elevades per unitat de volum i lleugeresa. Com a característiques negatives podríem destacar un risc major d'inflamabilitat o explosió si es porta a la bateria a nivells de voltatge fora dels recomanats.

Les cel·les d'una bateria LIPO han d'estar carregades a un voltatge d'entre 3,7 V (límit inferior) i 4,2 V (límit superior), uns valor més alts que en altres bateries i per tant menor necessitat de celes pel general.

Pel general les bateries LIPO tenen un nombre de cel·les superior a 2 però poden ser d'1S fins a 6S (1 cel·la a 6). Les capacitats de les bateries són un múltiple del valor inferior de voltatge de cel·la, és a dir, múltiples de 3,7V (les de 6S corresponen a un voltatge de 22,2V). També és possible connectar cel·les en paral·lel per augmentar la capacitat de la bateria, per exemple 3S3P equival a 3 cel·les en sèrie i 3 en paral·lel.

4.1.1. Característiques de la bateria emprada

La bateria que alimenta el dron és la Desire Power V8 Series 6s 8000mAh 20C (22,2v).



Figura 4.1. Bateria LIPO Desire Power V8 Series 6s 8000mAh 20C (22,2v) (Font: rc-innovations.es)

Característiques tècniques de la bateria:

- 6S (22,2V)
- Capacitat: 8000 mAh
- Tassa C: 20C (pot subministrar com a màxim 160 A durant 3 minuts)
- Velocitat de càrrega: 2C (Pot carregar-se a una intensitat constant de fins a 16A (30 min), tot i ser recomanable carregar com a màxim a 1C (fins a 8A, 1 hora).

4.1.2. Profunditat de descàrrega

A 3,7 V per cel·la les bateries LIPO tenen aproximadament un 30% de la càrrega total, però aquestes no poden descarregar-se per complet, si baixen de 3,0 V per cel·la hi haurà danys i risc d'incendi en recarregar-se. També és perillós no posar límit en la descàrrega ja que acabar la bateria en ple vol pot fer baixar el dron de forma abrupta i provocar danys en el mateix.

La qüestió és saber on posar el límit de profunditat de descàrrega. Hi ha qui marca el límit en un 50% de la càrrega (3,9V per cel·la), valor bastant conservador, i qui apura més sent menys cautelós. Els criteris per escollir un límit són variats i és difícil saber quin és l'òptim. Un bon criteri és el del 40%, un límit cautelós que ajudarà a conservar la bateria i sobretot preveu una possible prolongació del vol en cas de que algun succés durant aquest obligui a allargar-lo per no poder ser possible l'aterratge en aquell moment, en aquests casos s'arribaria a deixar el 20% de la càrrega. D'aquesta manera no es posen en perill ni les bateries ni el propi dron. És per això que a l'hora de fer els càlculs per obtenir les

necessitats energètics es tindrà en compte un 30% de càrrega restant (la mitjana entre els valors anomenats d'aquest cas), límit al qual li correspon un 70% de profunditat de descàrrega.

4.2. Pèrdues rere la captació i l'emmagatzematge

El sistema, com qualsevol instal·lació solar o eòlica, tindrà una sèrie de pèrdues tant a la captació com a l'hora de l'emmagatzemament. A continuació mostrem els càlculs amb els quals transformem les necessitats netes a necessitats on es tenen en compte totes les pèrdues.

Les necessitats netes seran el resultat del següent càlcul:

$$E_{net} = C_{bat} \cdot V_{bat} \cdot N_{bat} \cdot PD_{bat} \cdot n \quad (\text{Eq. 7})$$

On:

E_{net} és l'energia necessària a cobrir per dia en Wh/dia

C_{bat} és la capacitat nominal de les bateries del dron en Ah

V_{bat} és el voltatge nominal de les bateries del dron en Volts

N_{bat} és el nombre de bateries que equipa el dron (2)

PD_{bat} és la profunditat de descàrrega seleccionada per a les bateries del dron en tant per 1

n és el nombre de viatges (càrregues) que farà el dron diàriament

Aquestes necessitats netes no són les suficients per tenir en compte, ja que existeixen pèrdues en el connexionat que s'estimen en un 10% del consum net. A partir d'ara es treballa amb consum en Ah:

$$C_{net} = \frac{E_{net}}{V_{nom}} \quad (\text{Eq. 8})$$

On:

C_{net} és el consum net en ampers hora

V_{nom} és el voltatge nominal de treball de la instal·lació o sistema en Volts

$$C_{req} = 1,1 \cdot C_{net} \quad (\text{Eq. 9})$$

On C_{req} és el consum tenint en compte les pèrdues del connexionat

Per últim cal tenir en compte les pèrdues relacionades amb l'emmagatzemament:

$$C'_{req} = \frac{C_{req}}{K_T} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$K_T = [1 - (K_B K_C K_R K_X)] \cdot \left[1 - \frac{K_A D_{aut}}{P_{D,sist}} \right] \quad (\text{Eq. 11})$$

On:

C'_{req} és el consum corregit tenint en compte les pèrdues d'emmagatzemament

K_T són les pèrdues totals en aquest procés

K_A són les pèrdues degudes a l'autodescàrrega diària dels acumuladors a 20°C

K_B són les pèrdues degudes al rendiment de l'acumulador

K_C són les pèrdues degudes al rendiment de l'inversor

K_R són les pèrdues degudes al rendiment del regulador

K_X són altres pèrdues no contemplades

D_{aut} són els dies d'autonomia de la instal·lació

$P_{D,sist}$ és la profunditat de descàrrega màxima dels acumuladors

4.3. Tria de paràmetres per l'obtenció de la demanda energètica

En aquest apartat donarem valor als paràmetres de les fórmules que apareixen a l'apartat anterior per al nostre cas d'estudi de manera que es justifiqui l'obtenció dels valors de necessitats energètiques del sistema a dimensionar.

C_{bat} tindrà un valor de 8000 mAh o el que és el mateix 8 Ah tal i com se'ns indica a les característiques tècniques de la bateria.

V_{bat} té un valor de 22,2 V amb el mateix motiu.

N_{bat} té el valor 2, ja que el dron equipa 2 bateries.

PD_{bat} té un valor de 0.7 tal i com s'especifica anteriorment.

n serà una variable de la qual dependrà el valor de les necessitats energètiques.

V_{nom} tindrà el mateix valor que el voltatge en el punt màxim de potència del panell fotovoltaic.

K_A sol venir al full de característiques de la bateria però per defecte es 0,5 %.

K_B s'estima que serà d'un 5% en aquest sistema.

K_C s'estima que serà d'un 5% en aquest sistema.

K_R al tractar-se d'un mppt suposem 5%.

K_X també s'estima en 5%.

D_{aut} per a una instal·lació crítica, on és imprescindible que estigui funcionant el 100% del temps sense interrupcions, per a Barcelona s'estimaria que calen bateries com per a que el sistema funcioni durant 15 dies de forma autònoma (un cas molt extrem de dies sense sol que es donaria molt poc freqüentment), i això seria també suposant que el sistema funcionarà tot l'any. Com aquest no és el cas s'estima que 4 dies d'autonomia són suficients per al nostre sistema ja que les recomanacions normalment van de 3 a 5.

$P_{D,max}$ serà un 70% (0,5 en tant per 1) ja que en bateries solars de gel, tecnologia que s'utilitzarà en aquest projecte, els fabricants recomanen no descarregar-les per sota del 60-80% de la capacitat nominal en cas de voler una llarga vida útil. [7]

Dit tot això podem observar que la variable que ens determinarà el valor que busquem és el nombre de viatges diaris que voldrem que faci el dron. Un possible usuari que utilitzi el nostre sistema serà

qui determini aquesta dada per això no tanquem les opcions. Després de l'obtenció de les dades de recurs solar i eòlic disponible a través d'un model de panell i un model d'aerogenerador que se'ns ha donat podrem saber quantes unitats d'aquests caldran per cobrir la demanda (variable) d'energia que hi haurà durant un període de l'any que també pot variar. És llavors quan es podran extreure conclusions sobre quin tipus de tecnologia és més adient en el cas que tractem.

5. Càlcul del dimensionat energètic

5.1. Mode solar

Anteriorment s'han mencionat i explicat les taules de radiació solar com a recurs a partir del qual obtenir el recurs solar disponible per aprofitar i així calcular la superfície de panells necessària per cobrir una demanda energètica. Normalment aquestes taules van referides a unes inclinacions de panell concretes i estan ubicades en punts concrets, ja que és necessari haver mesurat in situ i normalment els panells no són mòbils.

Per al nostre sistema volem més precisió i per això s'ha pensat en un sistema de seguiment solar de dos eixos on l'orientació i la inclinació del panell faran, en tot moment, que aquest mateix estigui encarat al Sol de forma que els raigs solars arribin perpendicularment i així maximitzar la radiació incident. Això seria possible gracies a l'actuació de 2 servomotors programats per fer aquesta funció.

Per obtenir dades de radiació amb seguiment solar el procés no és tan trivial com buscar una taula de radiació. Haurem de buscar les dades mitjançant altra eina i fent càlculs. Per aquest projecte s'ha fet servir una eina molt útil com és PVGIS.

5.1.1. PVGIS

Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) és una eina d'àmbit europeu que combina un mapa interactiu amb una gran base de dades de radiació de tota Europa i Àfrica [10]. Mitjançant aquesta eina és possible obtenir dades de radiació en una ampla diversitat de modalitats, inclinacions, orientacions, etc. de qualsevol punt d'aquests territoris. A continuació s'explica el seu funcionament.

PVGIS necessita dades sobre radiació solar per fer estimacions del rendiment dels sistemes fotovoltaics i fer els altres càlculs possibles a la web. Existeixen diverses fonts de dades de radiació solar i és important comprendre els punts forts i febles de cada origen de dades. A la nova versió de PVGIS (2010), s'han inclòs una selecció de bases de dades de radiació solar per a algunes regions.

Les dues fonts principals de dades sobre radiació solar a la superfície de la terra són:

- Càlculs basats en dades de satèl·lit

- Mesura en terra de la radiació solar

Les mesures directes de la radiació solar a nivell del sòl es poden fer amb una sèrie d'instruments diferents (el més utilitzat és el piranòmetre) que capten tota la radiació procedent del sol i del cel o els núvols. Les mesures de les estacions terrestres donen els millors resultats. Es pot mesurar amb una resolució de temps elevada, normalment cada minut però és possible més sovint.

Quan no hi ha mesures directes en un lloc determinat, encara es poden estimar aquestes a partir d'altres que es fan a prop. És clar que la qualitat de l'estimació disminuirà a mesura que augmenta la distància al lloc de mesura però també és possible combinar dades de diferents ubicacions de mesura per fer una estimació de la radiació solar en un lloc situat entre aquests dos punts.

Estimacions de radiació solar via satèl·lits

Per calcular la radiació solar a nivell del sòl utilitzant dades de satèl·lits existeixen una sèrie de mètodes. Els satèl·lits mesuren la llum (visible o infraroja) que ve de la Terra (principalment la llum reflectida des del terra o des dels núvols), per tant el càlcul de la radiació solar a nivell del sòl ha de tenir en compte la radiació absorbida per l'atmosfera i la reflectida pels núvols.

S'empren diferents tipus de satèl·lits per duu a terme aquesta tasca. Els satèl·lits meteorològics geoestacionaris prenen imatges de la Terra a intervals curts (15 / 30 minuts) per tenir una resolució de temps força bona. Els píxels de la imatge solen equivaldre a quadrats d'uns quants km de costat, de manera que l'estimació de la radiació solar per a cada píxel serà assignada a aquesta àrea. Els satèl·lits d'òrbita polar s'aproximen a la Terra, llavors resolució de l'espai és millor, però no es mantenen permanentment per sobre d'una àrea determinada i per tant poden prendre només un parell d'imatges al dia d'una àrea determinada. Les dades utilitzades per PVGIS provenen principalment de satèl·lits geoestacionaris.

Els mètodes basats en satèl·lit proporcionen una cobertura bastant uniforme de grans àrees mentre que les estacions de terra solen estar molt separades, però també hi ha algun inconvenient:

- La neu es veu molt semblant als núvols de les imatges de satèl·lit i això és un petit problema ja que hi ha mètodes per superar aquest problema, però la incertesa és més alta en zones amb neu.
- Un píxel pot cobrir una zona amb altitud força variable a les zones de muntanya. La radiació solar en funció de l'altitud no està ben representada en els càlculs basats en satèl·lit.
- El càlcul de dades per satèl·lit és difícil si el sol és molt baix en el cel. Això pot causar problemes, en particular a latituds altes durant l'hivern.

En definitiva cal comprovar la qualitat de les estimacions basades en satèl·lits en comparació amb les mesures de l'estació terrestre d'alta qualitat per, mitjançant la combinació d'ambdós tipus d'informació es puguin aconseguir dades de millor qualitat.

Les bases de dades PVGIS existents es basen en els següents tipus de dades:

PVGIS Europa original

La base de dades PV original per a Europa es basa en una interpolació de les mesures de la estació terrestre. Les dades de mesura de l'estació terrestre són la mitjana mensual a llarg termini de la irradiació global i difusa en un pla horitzontal.

PVGIS Àfrica original

Aquesta base de dades es basa en els càlculs basats en satèl·lit realitzats a MINES ParisTech utilitzant dades de la primera generació de la sèrie de satèl·lits de Meteosat. La resolució espacial del càlcul original és de 15 arc-minuts.

Nova base de dades CM-SAF-PVGIS per a Europa i Àfrica

Aquestes dades es basen en càlculs d'imatges de satèl·lit realitzades per CM-SAF. La base de dades representa un total de 12 anys de dades. A partir de la primera generació de satèl·lits de Meteosat (Meteosat 5-7), coneguda com MFG, hi ha dades de 1998 a 2005 i dels satèl·lits de Meteosat de segona generació (coneguts com MSG), hi ha dades de juny de 2006 a desembre de 2011. Les dades espacials La resolució és d'1,5 arc-minuts.

El nou conjunt de dades CM-SAF s'ha comparat extensament amb mesures d'alta qualitat a terra i en general, l'error general de tot l'any és força reduït (en gairebé tots els llocs l'error és inferior al 5%) per aquest motiu estem convençuts que, en la majoria dels llocs, el nou conjunt de dades és una millora.

L'aparença que té la interfície d'aquesta eina és la següent:

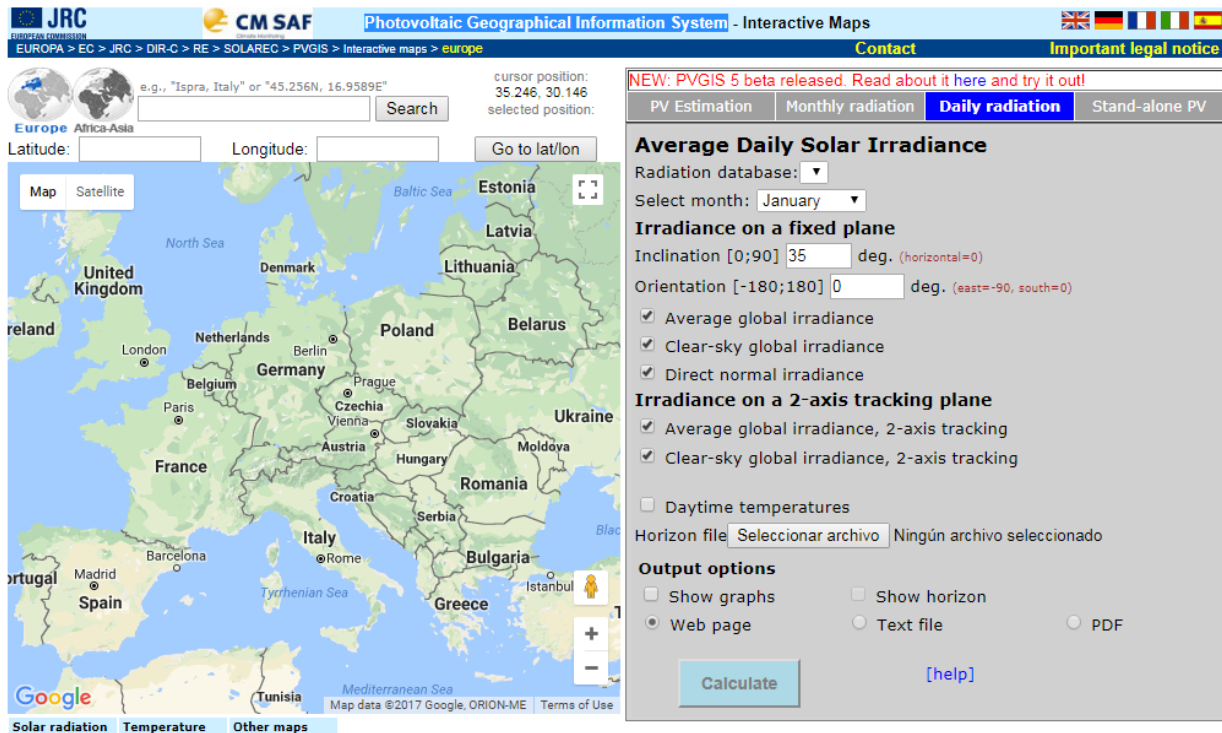


Figura 5.1. Interfície PVGIS (Font: re.jrc.ec.europa.eu)

Si introduïm les coordenades d'un punt (en el cas d'aquest treball, Barcelona) o pitgem aquest punt en el mapa i després seleccionem la pestanya "Daily radiation", tenim un seguit d'opcions com triar mes, orientació, inclinació... Les que ens interessin són les opcions de seguiment amb dos eixos (A "Irradiance on a 2-axis tracking plane") i la de "Text file". Si donem a "calculate" es descarrega un arxiu de text amb dades de radiació d'un dia mitjà del mes que s'ha seleccionat.

Dins de l'arxiu de text que es descarrega tenim varies columnes amb valors d'irradiància pressos cada quart d'hora. La columna que ens interessa és la d'irradiància global amb seguiment de 2 eixos, per tant l'agafem i la movem a un full de càlcul.

5.1.2. Utilització de les dades de PVGIS i càlcul de la producció energètica

Repetint el procés per a cadascun dels mesos de l'any obtindrem una taula com aquesta:

Hora	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny
5:22	0	0	0	0	61	8
5:37	0	0	0	0	138	159
5:52	0	0	0	119	243	264
6:07	0	0	0	222	330	350
6:22	0	0	78	315	407	427
6:37	0	0	178	391	474	495
6:52	0	0	306	456	532	554
7:07	0	110	399	512	582	605
7:22	0	213	478	559	625	650
7:37	121	323	544	599	663	689
7:52	217	404	599	634	696	723
8:07	321	471	646	664	724	752
8:22	394	527	685	689	748	777
8:37	453	574	718	711	769	799
8:52	502	613	746	729	786	818
9:07	542	646	770	745	801	833
9:22	575	674	790	758	814	847
9:37	603	698	807	769	824	858
9:52	626	718	821	778	832	867
10:07	646	734	833	785	839	874
10:22	662	748	842	791	845	880
10:37	676	760	850	796	849	885
10:52	687	769	856	799	853	889
11:07	696	777	861	802	855	892
11:22	702	783	865	804	857	894
11:37	707	787	867	806	859	896
11:52	710	790	869	807	860	897
12:07	712	791	870	807	860	897
12:22	712	791	870	807	860	898
12:37	710	790	869	807	860	898
12:52	707	787	867	806	860	898
13:07	702	783	865	804	860	898
13:22	696	777	861	802	859	897
13:37	687	769	856	799	857	897
13:52	676	760	850	796	855	896
14:07	662	748	842	791	853	894
14:22	646	734	833	785	849	892
14:37	626	718	821	778	845	889
14:52	603	698	807	769	839	885
15:07	575	674	790	758	832	880
15:22	542	646	770	745	824	874
15:37	502	613	746	729	814	867
15:52	453	574	718	711	801	858
16:07	394	527	685	689	786	847
16:22	321	471	646	664	769	833
16:37	217	404	599	634	748	818
16:52	9	323	544	599	724	799
17:07	0	213	478	559	696	777
17:22	0	9	399	512	663	752
17:37	0	0	306	456	625	723
17:52	0	0	178	391	582	689
18:07	0	0	8	315	532	650
18:22	0	0	0	222	474	605
18:37	0	0	0	13	407	554
18:52	0	0	0	0	330	495
19:07	0	0	0	0	243	427
19:22	0	0	0	0	15	350
19:37	0	0	0	0	0	264
19:52	0	0	0	0	0	15

Taula 5.1. Irradiància (W/m^2) mesurada cada quart d'hora al llarg d'un dia mitjà de cada mes a Barcelona de Gener a Juny (Font: Elaboració pròpia)

Hora	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Decembre
5:22	108	0	0	0	0	0
5:37	205	120	0	0	0	0
5:52	307	226	0	0	0	0
6:07	393	328	66	0	0	0
6:22	469	413	154	0	0	0
6:37	534	485	266	0	0	0
6:52	592	547	355	107	0	0
7:07	642	600	431	211	0	0
7:22	685	646	495	319	0	0
7:37	723	685	550	398	174	0
7:52	756	719	596	464	275	176
8:07	784	747	635	518	358	276
8:22	809	772	669	564	420	371
8:37	830	793	698	602	472	432
8:52	847	811	722	635	514	482
9:07	862	826	743	662	549	522
9:22	875	838	760	685	579	556
9:37	885	848	775	705	604	583
9:52	894	857	787	721	624	606
10:07	901	864	798	735	642	625
10:22	907	869	806	747	656	641
10:37	912	874	813	756	669	654
10:52	915	877	819	764	678	665
11:07	918	880	823	770	686	673
11:22	920	882	826	774	692	680
11:37	922	883	828	778	697	684
11:52	923	884	830	780	700	688
12:07	923	884	831	781	701	689
12:22	924	884	831	781	701	689
12:37	924	884	830	780	700	688
12:52	923	883	828	778	697	684
13:07	923	882	826	774	692	680
13:22	922	880	823	770	686	673
13:37	920	877	819	764	678	665
13:52	918	874	813	756	669	654
14:07	915	869	806	747	656	641
14:22	912	864	798	735	642	625
14:37	907	857	787	721	624	606
14:52	901	848	775	705	604	583
15:07	894	838	760	685	579	556
15:22	885	826	743	662	549	522
15:37	875	811	722	635	514	482
15:52	862	793	698	602	472	432
16:07	847	772	669	564	420	371
16:22	830	747	635	518	358	276
16:37	809	719	596	464	275	176
16:52	784	685	550	398	174	0
17:07	756	646	495	319	0	0
17:22	723	600	431	211	0	0
17:37	685	547	355	11	0	0
17:52	642	485	266	0	0	0
18:07	592	413	154	0	0	0
18:22	534	328	7	0	0	0
18:37	469	226	0	0	0	0
18:52	393	11	0	0	0	0
19:07	307	0	0	0	0	0
19:22	205	0	0	0	0	0
19:37	0	0	0	0	0	0
19:52	0	0	0	0	0	0

Taula 5.2. Irradiància (W/m^2) mesurada cada quart d'hora al llarg d'un dia mitjà de cada mes a Barcelona de Juliol a Desembre (Font: Elaboració pròpia)



El següent pas és obtenir les hores solar pic del dia mitjà de cada més per poder calcular l'energia que aportarà cada panell fotovoltaic. Per fer això només cal suposar com a valors constants durant cada quart d'hora cada mitjana de mesura, és a dir, cada valor (és una aproximació força precisa) i per tant fer un sumatori de tots els valors de cada columna i multiplicar-los per 0,25 h. El resultat és l'energia solar rebuda per metre quadrat al llarg del dia en Watts hora. Si dividim el valor per 1000 W/kW obtenim les HSP.

	<i>Gener</i>	<i>Febrer</i>	<i>Març</i>	<i>Abril</i>	<i>Maig</i>	<i>Juny</i>	<i>Juliol</i>	<i>Agost</i>	<i>Setembre</i>	<i>Octubre</i>	<i>Novembre</i>	<i>Desembre</i>
Wh/dia	5248	6429,75	8121,5	8397	9747	10599,5	10655,5	9551,75	8023,25	6714	5345	5001,5
HSP	5,248	6,42975	8,1215	8,397	9,747	10,5995	10,6555	9,55175	8,02325	6,714	5,345	5,0015

Taula 5.3. Energia diària (Wh/dia) a cada mes i les HSP equivalents calculades (Font: Elaboració pròpia)

Un cop tenim les hores equivalents de funcionament diari dels nostres panells ja podem saber quanta energia aportaran, només hem de saber el voltatge i el corrent que genera el panell en el punt màxim de potència. També hem de saber que les HSP són un valor de equivalència però no són realment hores a 1kW/m^2 d'irradiància constant, la irradiància varia al llarg del dia i l'eficiència del panell no serà l'òptima (el de les condicions Standard a 1000W/m^2 i 25°C) i per tant s'ha d'aplicar un rendiment que acostuma a ser, en instal·lacions que usen aquest tipus de tecnologia, un 90%.

5.1.3. Model de panell fotovoltaic proposat

En aquest treball els panells que s'utilitzarien serien del model que s'utilitza actualment al laboratori del departament que s'encarrega d'aquest projecte (FME, Campus Sud), un model de panell solar de 150 W. El model té una bona relació qualitat/preu, és assequible i les seves característiques tècniques i dimensions es considera que són bones per a formar part d'un sistema energètic amb les característiques del que es pretén dimensionar. Les característiques tècniques es mostren a continuació junt amb un gràfic que relaciona la intensitat i el voltatge entregats per la placa en funció de la irradiància que incideix en ella.

Paràmetre	Valor
Màxima potència P_{\max}	150 W
Voltatge en circuit obert U_{oc}	22,5 V
Voltatge en el punt de màxima potència U_{mpp}	18,3 V
Corrent de curtcircuit I_{sc}	8,81 A
Corrent en el punt de màxima potència I_{mpp}	8,27 A
Dimensions	1508 x 680 x 31 mm
Pes	11,8 kg
Nombre de cèl·lules	36
Màxim corrent invers	15 A
Rang operatiu	-40°C a 85°C

Figura 5.2. Característiques tècniques del panell Fotovoltaic SW150 (Font: udomi.de)

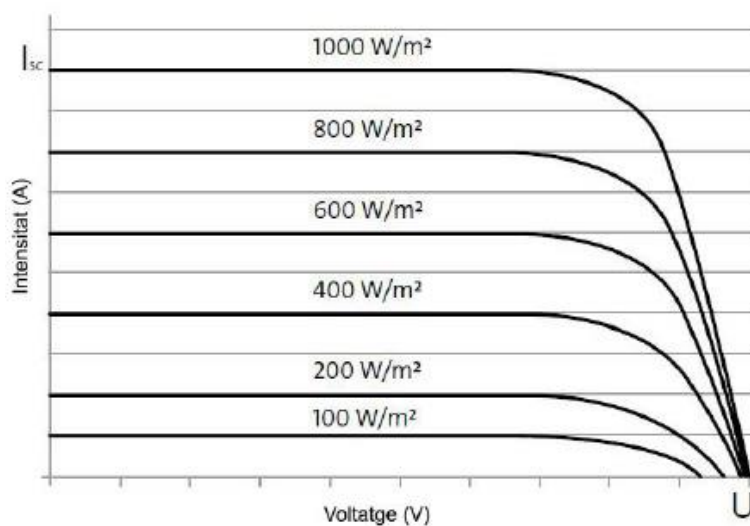


Figura 5.3. Corbes V-I per diferents irradiàncies del panell Fotovoltaic SW150 (Font: udomi.de)

5.2. Mode eòlic

Per al dimensionat eòlic cal, primer de tot, obtenir dades de vent. De la mateixa manera que a l'apartat solar hem emprat una eina com és PVGIS, també disposem d'una altra per aquesta part, en aquest cas es tracta d'un software anomenat Windographer.

5.2.1. Windographer

Windographer és un programa dissenyat específicament per obtenir dades sobre vent per a qualsevol tipus d'aplicació eòlica arreu del món. Es poden obtenir dades de diversos tipus (velocitat, direcció, temperatura, etc.) i en variats formats i períodes de temps. Es pot obtenir la rosa dels vents de l'emplaçament, velocitats mitges dia a dia durant llargs períodes, taules de freqüència de velocitats...

Pel cas que ens pertoca, s'ha seleccionat l'opció d'obtenir una taula de freqüències de velocitats de vent a Barcelona. A part també un histograma de vent diari durant 2 anys que ens permet saber quin màxim de dies consecutius de vent no aprofitable ens trobem a la zona, per poder triar un nombre de dies d'autonomia correcte, amb el qual s'extreu que l'autonomia triada a l'apartat solar és també suficient en aquest cas. La taula de freqüències és la següent:

V. baixa (m/s)	V. alta (m/s)	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny
0	0,25	0	0,011	0,034	0,017	0,051	0,029
0,25	0,5	0,017	0,034	0,051	0,04	0,114	0,074
0,5	0,75	0,034	0,017	0,057	0,12	0,154	0,188
0,75	1	0,114	0,057	0,143	0,154	0,245	0,2
1	1,25	0,148	0,086	0,171	0,16	0,177	0,251
1,25	1,5	0,148	0,108	0,16	0,245	0,28	0,28
1,5	1,75	0,171	0,148	0,183	0,268	0,268	0,36
1,75	2	0,274	0,16	0,154	0,211	0,337	0,331
2	2,25	0,257	0,217	0,188	0,331	0,234	0,371
2,25	2,5	0,257	0,194	0,217	0,342	0,377	0,314
2,5	2,75	0,211	0,131	0,257	0,422	0,394	0,445
2,75	3	0,371	0,177	0,228	0,394	0,474	0,377
3	3,25	0,371	0,188	0,177	0,388	0,342	0,439
3,25	3,5	0,445	0,2	0,228	0,405	0,285	0,514
3,5	3,75	0,377	0,245	0,285	0,514	0,4	0,417
3,75	4	0,28	0,217	0,303	0,434	0,348	0,537
4	4,25	0,371	0,171	0,308	0,542	0,36	0,497
4,25	4,5	0,245	0,166	0,24	0,337	0,394	0,457
4,5	4,75	0,263	0,223	0,234	0,342	0,342	0,411
4,75	5	0,194	0,194	0,228	0,223	0,297	0,348
5	5,25	0,223	0,16	0,257	0,291	0,285	0,28
5,25	5,5	0,217	0,268	0,205	0,285	0,245	0,217
5,5	5,75	0,148	0,257	0,217	0,245	0,331	0,171
5,75	6	0,223	0,32	0,143	0,263	0,217	0,171
6	6,25	0,188	0,308	0,183	0,131	0,194	0,126
6,25	6,5	0,183	0,274	0,234	0,177	0,188	0,12
6,5	6,75	0,2	0,314	0,24	0,068	0,171	0,063
6,75	7	0,211	0,24	0,245	0,108	0,205	0,068
7	7,25	0,177	0,223	0,177	0,103	0,177	0,046
7,25	7,5	0,228	0,24	0,211	0,063	0,126	0,023
7,5	7,75	0,223	0,12	0,143	0,08	0,097	0,034
7,75	8	0,148	0,177	0,177	0,051	0,091	0,017
8	8,25	0,188	0,16	0,217	0,086	0,017	0,017
8,25	8,5	0,183	0,148	0,245	0,046	0,029	0,011
8,5	8,75	0,16	0,137	0,143	0,034	0,023	0
8,75	9	0,091	0,108	0,211	0,04	0,034	0,011
9	9,25	0,12	0,143	0,177	0,034	0,04	0,006
9,25	9,5	0,126	0,08	0,171	0,057	0,04	0
9,5	9,75	0,074	0,103	0,12	0,063	0,029	0
9,75	10	0,068	0,097	0,114	0,034	0,017	0
10	10,25	0,068	0,057	0,063	0,011	0,023	0
10,25	10,5	0,057	0,051	0,114	0,023	0,006	0
10,5	10,75	0,074	0,051	0,12	0,017	0,006	0
10,75	11	0,074	0,057	0,074	0,017	0	0
11	11,25	0,046	0,068	0,103	0	0,011	0
11,25	11,5	0,029	0,08	0,08	0	0	0
11,5	11,75	0,006	0,086	0,04	0	0,006	0
11,75	12	0,017	0,074	0,023	0	0,011	0
12	12,25	0,017	0,04	0,017	0	0	0
12,25	12,5	0,011	0,046	0,034	0	0	0
12,5	12,75	0,006	0,074	0,034	0	0	0
12,75	13	0,017	0,057	0,029	0	0	0
13	13,25	0,011	0,046	0,017	0	0	0
13,25	13,5	0,046	0,034	0,023	0	0	0
13,5	13,75	0,006	0,011	0,011	0	0	0
13,75	14	0,006	0,006	0,006	0	0	0
14	14,25	0,023	0	0,006	0	0	0
14,25	14,5	0,011	0,011	0,006	0	0	0
14,5	14,75	0,006	0	0,006	0	0	0
14,75	15	0,006	0	0,011	0	0	0
15	15,25	0,011	0	0	0	0	0
15,25	15,5	0,017	0	0	0	0	0
15,5	15,75	0	0	0	0	0	0
15,75	16	0	0	0	0	0	0
Total		8,4920	7,6700	8,4930	8,2160	8,4920	8,2210

Taula 5.4. Taula de freqüències relatives de velocitats de vent a Barcelona Gener-Juny (Font: Windographer)



V. baixa (m/s)	V. alta (m/s)	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre	Total
0	0,25	0,023	0,023	0,006	0,029	0,04	0,017	0,28
0,25	0,5	0,097	0,046	0,08	0,143	0,057	0,086	0,839
0,5	0,75	0,108	0,148	0,097	0,177	0,074	0,137	1,311
0,75	1	0,137	0,188	0,177	0,188	0,126	0,291	2,02
1	1,25	0,24	0,194	0,183	0,245	0,137	0,263	2,255
1,25	1,5	0,354	0,228	0,274	0,377	0,325	0,468	3,247
1,5	1,75	0,342	0,342	0,342	0,4	0,223	0,502	3,549
1,75	2	0,342	0,382	0,508	0,502	0,303	0,479	3,983
2	2,25	0,382	0,308	0,514	0,337	0,32	0,348	3,807
2,25	2,5	0,451	0,445	0,548	0,457	0,331	0,485	4,418
2,5	2,75	0,434	0,417	0,537	0,394	0,234	0,428	4,304
2,75	3	0,394	0,531	0,445	0,417	0,297	0,4	4,505
3	3,25	0,445	0,599	0,576	0,462	0,354	0,348	4,689
3,25	3,5	0,474	0,576	0,525	0,485	0,32	0,4	4,857
3,5	3,75	0,394	0,514	0,365	0,434	0,28	0,245	4,47
3,75	4	0,365	0,525	0,445	0,439	0,371	0,308	4,572
4	4,25	0,314	0,508	0,371	0,36	0,348	0,251	4,401
4,25	4,5	0,388	0,622	0,211	0,337	0,245	0,211	3,853
4,5	4,75	0,388	0,428	0,331	0,365	0,263	0,194	3,784
4,75	5	0,371	0,325	0,325	0,274	0,24	0,171	3,19
5	5,25	0,371	0,234	0,211	0,245	0,16	0,12	2,837
5,25	5,5	0,24	0,285	0,154	0,171	0,2	0,097	2,584
5,5	5,75	0,297	0,148	0,16	0,205	0,251	0,148	2,578
5,75	6	0,228	0,12	0,126	0,183	0,2	0,08	2,274
6	6,25	0,177	0,097	0,114	0,103	0,217	0,097	1,935
6,25	6,5	0,154	0,04	0,12	0,108	0,183	0,171	1,952
6,5	6,75	0,131	0,034	0,074	0,148	0,154	0,12	1,717
6,75	7	0,097	0,046	0,091	0,057	0,211	0,177	1,756
7	7,25	0,051	0,017	0,051	0,12	0,188	0,166	1,496
7,25	7,5	0,017	0,011	0,091	0,057	0,268	0,16	1,495
7,5	7,75	0,017	0,023	0,017	0,074	0,223	0,143	1,194
7,75	8	0,057	0,057	0,029	0,023	0,086	0,137	1,05
8	8,25	0,057	0,011	0,029	0	0,143	0,126	1,051
8,25	8,5	0,046	0	0,034	0,04	0,126	0,148	1,056
8,5	8,75	0,017	0	0,023	0,034	0,16	0,074	0,805
8,75	9	0,011	0,011	0,023	0,034	0,131	0,068	0,773
9	9,25	0,017	0	0,011	0,006	0,017	0,051	0,622
9,25	9,5	0,006	0,006	0	0,017	0,051	0,057	0,611
9,5	9,75	0,006	0	0	0,006	0,046	0,063	0,51
9,75	10	0,006	0	0	0,023	0,011	0,04	0,41
10	10,25	0,006	0	0	0,006	0,034	0,046	0,314
10,25	10,5	0,006	0	0	0,011	0,046	0,029	0,343
10,5	10,75	0,011	0	0	0	0,023	0,04	0,342
10,75	11	0	0	0	0	0,023	0,006	0,251
11	11,25	0,006	0	0	0	0,051	0,017	0,302
11,25	11,5	0	0	0	0	0,017	0,017	0,223
11,5	11,75	0,011	0	0	0	0,017	0,023	0,189
11,75	12	0,006	0	0	0	0,017	0,011	0,159
12	12,25	0	0	0	0	0,017	0	0,091
12,25	12,5	0	0	0	0	0	0	0,091
12,5	12,75	0	0	0	0	0,006	0,006	0,126
12,75	13	0	0	0	0	0,006	0,006	0,115
13	13,25	0	0	0	0	0,017	0	0,091
13,25	13,5	0	0	0	0	0,006	0,011	0,12
13,5	13,75	0	0	0	0	0,011	0,006	0,045
13,75	14	0	0	0	0	0,006	0	0,024
14	14,25	0	0	0	0	0,006	0	0,035
14,25	14,5	0	0	0	0	0,006	0	0,034
14,5	14,75	0	0	0	0	0	0	0,012
14,75	15	0	0	0	0	0	0	0,017
15	15,25	0	0	0	0	0	0	0,011
15,25	15,5	0	0	0	0	0	0	0,017
15,5	15,75	0	0	0	0	0	0	0
15,75	16	0	0	0	0	0	0	0
Total		8,4920	8,4890	8,2180	8,4930	8,2230	8,4930	99,9920

Taula 5.5. Taula de freqüències relatives de velocitats de vent a Barcelona Juliol-Desembre (Font: Windographer)

Si representem, per a cada mes, els valors de la taula anterior en un gràfic velocitat-freqüència veiem el següent:

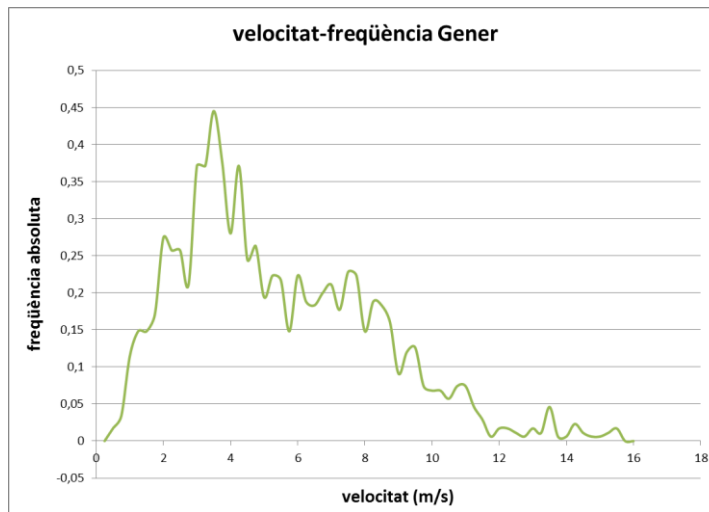


Figura 5.4. Corba v-f per el més de Gener a partir de dades de Windographer (Font: Elaboració pròpia)

Òbviament no s'obté una corba suau sinó bastant irregular, encara que es pot detectar quina és la tendència. Si utilitzéssim aquests valors per creuar-los amb els de la corba de potència de l'aerogenerador triat (es mostra més endavant) obtindríem uns valors de producció energètica força semblants als que s'obtenen amb la corba de distribució de probabilitat de Weibull però no precisos.

5.2.2. Obtenció de les corbes Weibull

Per obtenir la corba Weibull que volem cal seguir la metodologia explicada a l'apartat 1.2.1. per a cada columna corresponent a cada mes. Després de transformar les dades a freqüències relatives acumulades es procedeix a calcular " $\ln(-\ln(1-F(v)))$ " i " $\ln(v)$ " on " $F(v)$ " és la freqüència relativa acumulada corresponent a cada velocitat i " v " és la velocitat. Quan tots els punts estan calculats ja podem representar gràficament per després procedir a fer les regressions lineals. Totes les dades que es manipulen són molt nombroses però amb la ajuda d'Excel i la seva automatització dels càlculs és ràpid i senzill tractar-les. A continuació es mostra el conjunt de representacions gràfiques dels punts en format línia continua, ja que el format de punts no fa apreciar bé la dispersió a causa del gran nombre d'aquests.

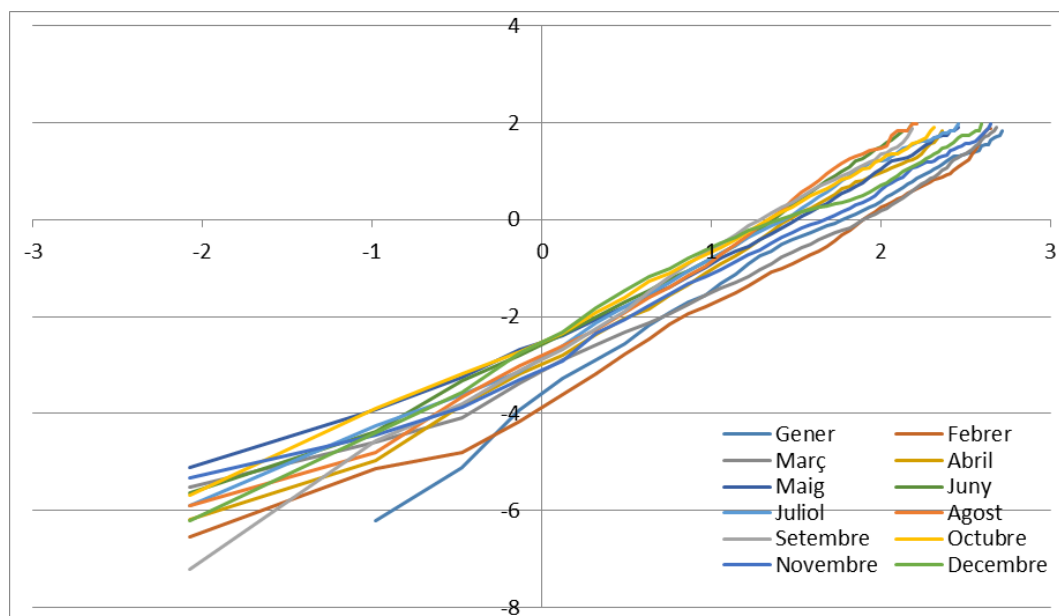


Figura 5.5. Representacions gràfiques dels punts en forma $\ln(-\ln(1-F(x)))=k(\ln(x)-\ln(c))$ a partir de les quals es fan les regressions lineals (Font: Elaboració pròpia)

Ara podem fer les regressions per obtenir els paràmetres de les rectes i calcular els de les distribucions Weibull amb Excel com s'ha explicat anteriorment. Els resultats són els següents:

	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny
m=k	2,0167	1,9038	1,7081	1,9037	1,6921	1,91
b	-3,6066	-3,5752	-3,067	-2,8453	-2,4168	-2,4519
c	5,97968048	6,53994237	6,02286055	4,45762337	4,17153628	3,61003431

	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
m=k	1,8542	2,0465	2,0842	1,7661	1,7044	1,678
b	-2,5773	-2,6368	-2,7735	-2,3357	-2,7581	-2,4914
c	4,01476777	3,62713719	3,783791	3,75286123	5,04412108	4,41383419

Taula 5.6. Taula amb els paràmetres m i b de les regressions lineals realitzades i paràmetres k i c de les distribucions de Weibull obtingudes per a cada mes de l'any (Font: Windographer)

Tenint els paràmetres calculats podem procedir a construir les corbes Weibull. Amb la funció DISTR.WEIBULL d'Excel podem calcular la probabilitat corresponent a cada interval de velocitats, recordem que es tracta d'una distribució contínua i que per tant a un valor de velocitat concret no li correspon una probabilitat sinó que li correspon a un interval. A continuació es mostra un exemple de corba de Weibull a la qual s'utilitzen els mateixos intervals que anteriorment a la construcció de la corba v-f.

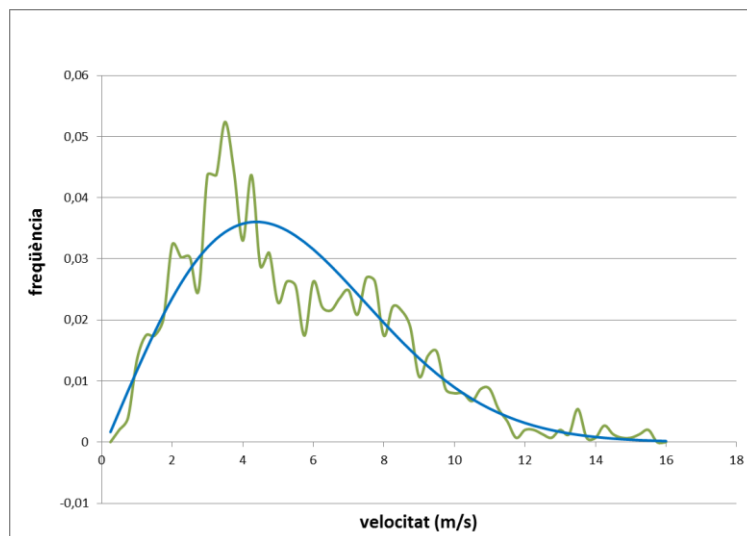


Figura 5.6. Corba Weibull front a corba v-f per el més de Gener (Font: Elaboració pròpia)

5.2.3. Aerogenerador proposat, corba de potència i càlcul de la producció energètica

El model d'aerogenerador proposat és un proposat pel director d'aquest projecte. Es tracta del model Superwind 350, un aerogenerador de 350 W de potència màxima (a partir de 12,5 m/s) i tensió a 12 o 24 volts segons els dos tipus de connexió amb que es pot fer servir. La seva corba de potència és la següent:

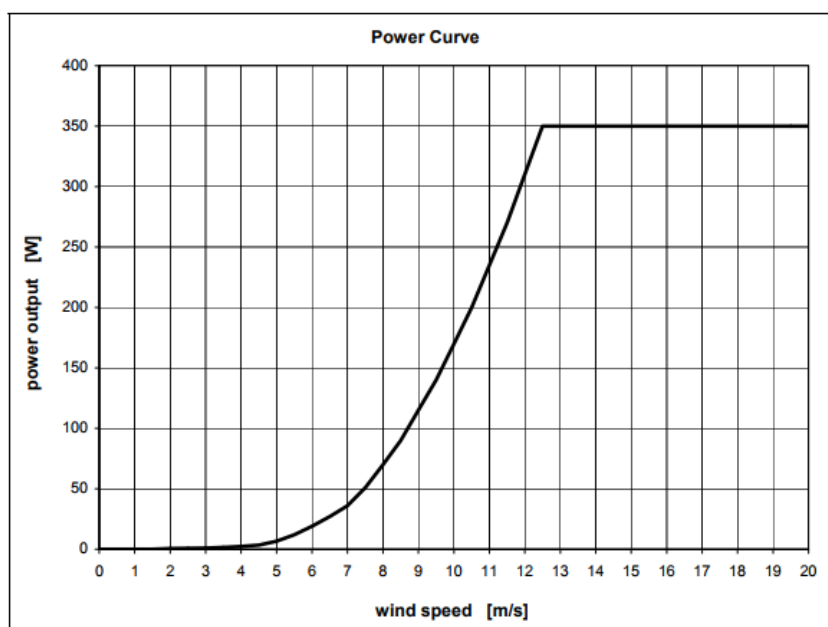


Figura 5.7. Corba de potència de l'aerogenerador triat (Font: udomi.de)

Podem comprovar que contínuament els intervals de velocitat utilitzats són els oferts per Windographer a l'hora d'haver descarregat les dades inicials de vent, són intervals de 0,25 m/s. Aquesta mida es considera força útil en quant a precisió, tant és així que si ens fixem en la corba de potència de l'aerogenerador, aquests intervals són inapreciables. És per aquest motiu que també s'ha hagut de duu a terme un procés de càlcul mitjançant Excel per extreure la potència corresponent a cada punt per poder creuar freqüències i potències de la manera més precisa.

El procés ha consistit en el següent: Hi ha certs punts de la corba fàcilment identificables com per exemple el punt (7'5 m/s , 50 W), si identifiquem tots i els representem en un gràfic i mitjançant "agregar línea de tendència" del clic dret al gràfic i marcant l'opció "polinómica" obtenim, de forma senzilla, la interpolació corresponent. Dins d'aquesta opció s'ha de triar el grau del polinomi que es vol obtenir, en aquest cas es podia considerar que un polinomi de grau 3 s'ajusta força precisament. Per últim hi ha l'opció "Presentar ecuación en el gráfico", aquest punt és el que ens interessa, ja que aquesta equació és la que es farà servir per calcular la potencia corresponent a cada rang de velocitats. Als valors menors a 4m/s els correspon un valor de potència 0 W, i als valors de 12,5 m/s i superiors, un valor de potència de 350 W, per tant els valors d'enmig són els que es fan servir per la interpolació.

La funció obtinguda és " $y = 0,9167x^3 - 11,714x^2 + 54,655x - 87,086$ " i aquests són els valors obtinguts de la corba:

V. baixa (m/s)	V. alta (m/s)	Potencia (W)	V. baixa (m/s)	V. alta (m/s)	Potencia (W)
0.00	0.25	0	8.00	8.25	81,19442812
0.25	0.50	0	8.25	8.50	91,83355
0.50	0.75	0	8.50	8.75	103,1411719
0.75	1.00	0	8.75	9.00	115,1151
1.00	1.25	0	9.00	9.25	127,7531406
1.25	1.50	0	9.25	9.50	141,0531
1.50	1.75	0	9.50	9.75	155,0127844
1.75	2.00	0	9.75	10.00	169,63
2.00	2.25	0	10.00	10.25	184,9025531
2.25	2.50	0	10.25	10.50	200,82825
2.50	2.75	0	10.50	10.75	217,4048969
2.75	3.00	0	10.75	11.00	234,6303
3.00	3.25	0	11.00	11.25	252,5022656
3.25	3.50	0	11.25	11.50	271,0186
3.50	3.75	0	11.50	11.75	290,1771094
3.75	4.00	3,7788	11.75	12.00	309,9756
4.00	4.25	4,984673437	12.00	12.25	330,4118781
4.25	4.50	6,1872875	12.25	12.50	350
4.50	4.75	7,472582812	12.50	12.75	350
4.75	5.00	8,9265	12.75	13.00	350
5.00	5.25	10,63497969	13.00	13.25	350
5.25	5.50	12,6839625	13.25	13.50	350
5.50	5.75	15,15938906	13.50	13.75	350
5.75	6.00	18,1472	13.75	14.00	350
6.00	6.25	21,7333594	14.00	14.25	350
6.25	6.50	26,0037375	14.25	14.50	350
6.50	6.75	31,04434531	14.50	14.75	350
6.75	7.00	36,9411	14.75	15.00	350
7.00	7.25	43,77994219	15.00	15.25	350
7.25	7.50	51,6468125	15.25	15.50	350
7.50	7.75	60,62765156	15.50	15.75	350
7.75	8.00	71,226	15.75	16.00	350

Taula 5.7. Taula de valors de potència de l'aerogenerador calculats corresponents a diferents velocitats d'aire segons la seva corba de potència (Font: Elaboració pròpia a partir de dades del manual tècnic)

Finalment, tenint valors de potència que subministra l'aerogenerador i valors de freqüència relativa per a cada segment de velocitats de vent, es poden creuar aquestes dades de la següent manera:

1. Per a cada interval fem el producte entre la freqüència i la potència a la que treballarà.
2. Fem el sumatori de tots aquests productes per a cada mes.
3. El resultat el multipliquem per 24h (les freqüències relatives obtingudes a Weibull estan referides a un dia) per obtenir la producció energètica diària en Wh/dia.

$$P_{En} = 24 \cdot \sum_{i=1}^n f_i \cdot P_i \quad (\text{Eq. 12})$$

On:

P_{En} és la producció energètica diària

f_i és la freqüència esperada per a un petit interval de velocitats concret en un mes concret

P_i és la potència que subministra l'aerogenerador amb una velocitat de vent

5.3. Selecció de tecnologia i resultat dels dimensionats

Fins ara s'ha mostrat tot el procés necessari per calcular tant la demanda energètica del nostre sistema, com la producció energètiques que pot generar cadascuna de les dues tecnologies per unitat de dispositiu durant un dia mitjà en funció del mes de l'any en que ens trobem. Cal recordar que a l'hora del càlcul de la demanda energètica es va optar per no fixar un valor concret per al nombre de viatges que faria el Dron diàriament i és per això que els resultats es presentaran en funció d'aquest paràmetre variable a gust del client o usuari que faci servir el sistema.

5.3.1. Plantejament inicial i procés per al dimensionat

Si tenim necessitats i producció energètica per unitat a cada mes, l'últim càlcul és tan senzill com el quocient entre ambdós valors a cada cas.

Per duu a terme aquest procés s'ha construït una plantilla a un full de càlcul d'Excel en el qual s'han d'introduir les dades de radiació solar i de vent, les especificacions tècniques dels mòduls solars, les de l'aerogenerador i de les bateries tant de dron com de sistema a utilitzar.

Panell solar		Bateria Sistema		Bateria Dron	
Vmppt (V)	18,3	C bat (Ah)	230	C bat (Ah)	8
Imppt (A)	8,27	V bat (V)	24	PD	0,7
		PD	0,6	C corr (Ah)	5,6
		Dies aut.	5	V bat (V)	22,2
				nº bat	2

Taula 5.8. Dades a introduir referents a components del sistema. (Font: Elaboració pròpia)

Per al mode eòlic cal introduir la corba de potència corresponent en forma numèrica, és a dir transformant prèviament la corba (representació gràfica) a una taula de valors de potència corresponents a cada interval de velocitats, com s'ha mostrat prèviament.

A continuació es mostren els resultats obtinguts per a cada tecnologia, per a cada mes i per a cada valor de nombre de vols diaris de l'1 a 32 (32 és el nombre màxim de cicles càrrega-descàrrega possibles en 24 h tenint en compte una càrrega a 2C, 30 min, i una descàrrega en 15 min:

Mode solar

viatges	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
1	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5
2	1,0	0,8	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,8	1,0	1,0
3	1,5	1,2	1,0	0,9	0,8	0,7	0,7	0,8	1,0	1,2	1,5	1,6
4	2,0	1,6	1,3	1,2	1,1	1,0	1,0	1,1	1,3	1,6	1,9	2,1
5	2,5	2,0	1,6	1,5	1,3	1,2	1,2	1,4	1,6	1,9	2,4	2,6
6	3,0	2,4	1,9	1,9	1,6	1,5	1,5	1,6	1,9	2,3	2,9	3,1
7	3,5	2,8	2,2	2,2	1,9	1,7	1,7	1,9	2,3	2,7	3,4	3,6
8	4,0	3,2	2,6	2,5	2,1	2,0	2,0	2,2	2,6	3,1	3,9	4,2
9	4,5	3,6	2,9	2,8	2,4	2,2	2,2	2,5	2,9	3,5	4,4	4,7
10	5,0	4,0	3,2	3,1	2,7	2,5	2,4	2,7	3,2	3,9	4,9	5,2
11	5,5	4,5	3,5	3,4	2,9	2,7	2,7	3,0	3,6	4,3	5,4	5,7
12	6,0	4,9	3,8	3,7	3,2	2,9	2,9	3,3	3,9	4,7	5,8	6,2
13	6,4	5,3	4,2	4,0	3,5	3,2	3,2	3,5	4,2	5,0	6,3	6,8
14	6,9	5,7	4,5	4,3	3,7	3,4	3,4	3,8	4,5	5,4	6,8	7,3
15	7,4	6,1	4,8	4,6	4,0	3,7	3,7	4,1	4,9	5,8	7,3	7,8
16	7,9	6,5	5,1	5,0	4,3	3,9	3,9	4,4	5,2	6,2	7,8	8,3
17	8,4	6,9	5,4	5,3	4,5	4,2	4,2	4,6	5,5	6,6	8,3	8,8
18	8,9	7,3	5,8	5,6	4,8	4,4	4,4	4,9	5,8	7,0	8,8	9,4
19	9,4	7,7	6,1	5,9	5,1	4,7	4,6	5,2	6,2	7,4	9,3	9,9
20	9,9	8,1	6,4	6,2	5,3	4,9	4,9	5,5	6,5	7,8	9,7	10,4
21	10,4	8,5	6,7	6,5	5,6	5,2	5,1	5,7	6,8	8,1	10,2	10,9
22	10,9	8,9	7,1	6,8	5,9	5,4	5,4	6,0	7,1	8,5	10,7	11,4
23	11,4	9,3	7,4	7,1	6,1	5,6	5,6	6,3	7,5	8,9	11,2	12,0
24	11,9	9,7	7,7	7,4	6,4	5,9	5,9	6,5	7,8	9,3	11,7	12,5
25	12,4	10,1	8,0	7,7	6,7	6,1	6,1	6,8	8,1	9,7	12,2	13,0
26	12,9	10,5	8,3	8,1	6,9	6,4	6,4	7,1	8,4	10,1	12,7	13,5
27	13,4	10,9	8,7	8,4	7,2	6,6	6,6	7,4	8,8	10,5	13,1	14,1
28	13,9	11,3	9,0	8,7	7,5	6,9	6,8	7,6	9,1	10,9	13,6	14,6
29	14,4	11,7	9,3	9,0	7,7	7,1	7,1	7,9	9,4	11,2	14,1	15,1
30	14,9	12,1	9,6	9,3	8,0	7,4	7,3	8,2	9,7	11,6	14,6	15,6
31	15,4	12,5	9,9	9,6	8,3	7,6	7,6	8,4	10,1	12,0	15,1	16,1
32	15,9	13,0	10,3	9,9	8,5	7,9	7,8	8,7	10,4	12,4	15,6	16,7

Taula 5.9. Taula de valors d'unitats necessàries de panells solars model SW150 d'UDOMI per a diferents demandes i diferents mesos (Font: Elaboració pròpia)

Mode eòlic

viatges	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
1	0,4	0,3	0,3	1,0	1,1	2,6	1,5	3,0	2,6	1,8	0,5	0,8
2	0,8	0,5	0,6	2,1	2,1	5,2	3,1	6,0	5,1	3,6	1,1	1,7
3	1,1	0,8	1,0	3,1	3,2	7,8	4,6	9,0	7,7	5,4	1,6	2,5
4	1,5	1,1	1,3	4,2	4,2	10,4	6,1	12,0	10,2	7,3	2,2	3,4
5	1,9	1,4	1,6	5,2	5,3	13,0	7,6	15,0	12,8	9,1	2,7	4,2
6	2,3	1,6	1,9	6,3	6,4	15,7	9,2	18,0	15,4	10,9	3,2	5,0
7	2,6	1,9	2,2	7,3	7,4	18,3	10,7	21,0	17,9	12,7	3,8	5,9
8	3,0	2,2	2,5	8,3	8,5	20,9	12,2	23,9	20,5	14,5	4,3	6,7
9	3,4	2,5	2,9	9,4	9,5	23,5	13,7	26,9	23,1	16,3	4,8	7,6
10	3,8	2,7	3,2	10,4	10,6	26,1	15,3	29,9	25,6	18,1	5,4	8,4
11	4,2	3,0	3,5	11,5	11,7	28,7	16,8	32,9	28,2	20,0	5,9	9,2
12	4,5	3,3	3,8	12,5	12,7	31,3	18,3	35,9	30,7	21,8	6,5	10,1
13	4,9	3,6	4,1	13,5	13,8	33,9	19,8	38,9	33,3	23,6	7,0	10,9
14	5,3	3,8	4,4	14,6	14,8	36,5	21,4	41,9	35,9	25,4	7,5	11,8
15	5,7	4,1	4,8	15,6	15,9	39,1	22,9	44,9	38,4	27,2	8,1	12,6
16	6,1	4,4	5,1	16,7	17,0	41,8	24,4	47,9	41,0	29,0	8,6	13,4
17	6,4	4,7	5,4	17,7	18,0	44,4	25,9	50,9	43,5	30,8	9,2	14,3
18	6,8	4,9	5,7	18,8	19,1	47,0	27,5	53,9	46,1	32,7	9,7	15,1
19	7,2	5,2	6,0	19,8	20,2	49,6	29,0	56,9	48,7	34,5	10,2	16,0
20	7,6	5,5	6,3	20,8	21,2	52,2	30,5	59,9	51,2	36,3	10,8	16,8
21	7,9	5,8	6,7	21,9	22,3	54,8	32,0	62,9	53,8	38,1	11,3	17,6
22	8,3	6,0	7,0	22,9	23,3	57,4	33,6	65,8	56,4	39,9	11,8	18,5
23	8,7	6,3	7,3	24,0	24,4	60,0	35,1	68,8	58,9	41,7	12,4	19,3
24	9,1	6,6	7,6	25,0	25,5	62,6	36,6	71,8	61,5	43,5	12,9	20,2
25	9,5	6,9	7,9	26,1	26,5	65,2	38,1	74,8	64,0	45,4	13,5	21,0
26	9,8	7,1	8,3	27,1	27,6	67,9	39,7	77,8	66,6	47,2	14,0	21,8
27	10,2	7,4	8,6	28,1	28,6	70,5	41,2	80,8	69,2	49,0	14,5	22,7
28	10,6	7,7	8,9	29,2	29,7	73,1	42,7	83,8	71,7	50,8	15,1	23,5
29	11,0	8,0	9,2	30,2	30,8	75,7	44,3	86,8	74,3	52,6	15,6	24,4
30	11,4	8,2	9,5	31,3	31,8	78,3	45,8	89,8	76,8	54,4	16,2	25,2
31	11,7	8,5	9,8	32,3	32,9	80,9	47,3	92,8	79,4	56,2	16,7	26,0
32	12,1	8,8	10,2	33,3	33,9	83,5	48,8	95,8	82,0	58,1	17,2	26,9

Taula 5.10. Taula de valors d'unitats necessàries d'aerogeneradors model Superwind350 d'UDOMI per a diferents demandes i diferents mesos (Font: Elaboració pròpia)

És cert que per a l'elaboració d'aquests càlculs s'han escollit uns models de panell i aerogenerador concrets i que en funció de la tria la comparació entre una tecnologia i una altra pot variar, però tenint en compte que l'aerogenerador utilitzat és un model amb baixa potència i per tant amb un suposat bon aprofitament de velocitats comuns (no massa altes) del territori on estem aplicant aquest projecte, podem apreciar ràpidament que l'opció eòlica en aquest cas surt perdent per molta diferència.

Els tres primers mesos de l'any són els únics on el nombre necessari d'aerogeneradors per cobrir les diferents demandes energètiques és menor que el de panells fotovoltaics, però per molt poca diferència, ben bé igual. Si a més tenim en compte la diferència de preus entre ambdós dispositius on el panell ronda els 160 € i l'aerogenerador els 400 €, llavors queda clar que en aquest cas el mode eòlic queda descartat.

Podem observar també un altra característica negativa relativa al mode eòlic com és irregularitat de disponibilitat de recurs eòlic al llarg de l'any en aquesta zona, Barcelona. Així com es pot veure que hi ha mesos on mitjançant aerogeneradors del model triat pot arribar a cobrir-se la demanda d'una manera raonable, ni ha d'altres on el valor calculat es dispara degut a l'absència de recurs eòlic. Per remarcar està el fet de que el nombre de dispositius a utilitzar al mes més desfavorable és aproximadament 8 vegades el valor del mes més favorable (no encara així suficientment favorable).

Nova proposta de model d'aerogenerador

Veient tan desfavorables resultats per part del mode eòlic, es sospita que l'aerogenerador emprat no és suficientment eficient amb certes velocitats que interessaria aprofitar degut a les característiques amb que es dóna el recurs eòlic en aquesta zona. És per això que es procedeix a realitzar el procés de càlcul eòlic explicat anteriorment per a un altre aerogenerador ben diferent, de majors dimensions i potència.

Si es pretén que el sistema sencer sigui "portàtil", en aquest cas fàcil de traslladar fins a una zona mitjançant un transport del tipus cotxe o furgoneta, es considera que un rotor d'aproximadament 3 metres de diàmetre és acceptable ja que les aspes tindrien aproximadament una longitud de metre i mig, cosa que permet el proposat.

L'aerogenerador amb el qual farem el càlcul és un aerogenerador de 3000 W de potència en el seu punt màxim amb unes dimensions com les comentades al paràgraf anterior. És cert que el masteler recomanat ha de ser d'entre 7 i 10 metres com s'indica al seu manual, però aquest pot ser desmuntable per peces de dimensió més reduïda. El model és el *Ecosolar Aero 1000 24V*, la seva potència nominal s'assoleix amb tan sols 8 m/s. La seva corba de potència es mostra a continuació.

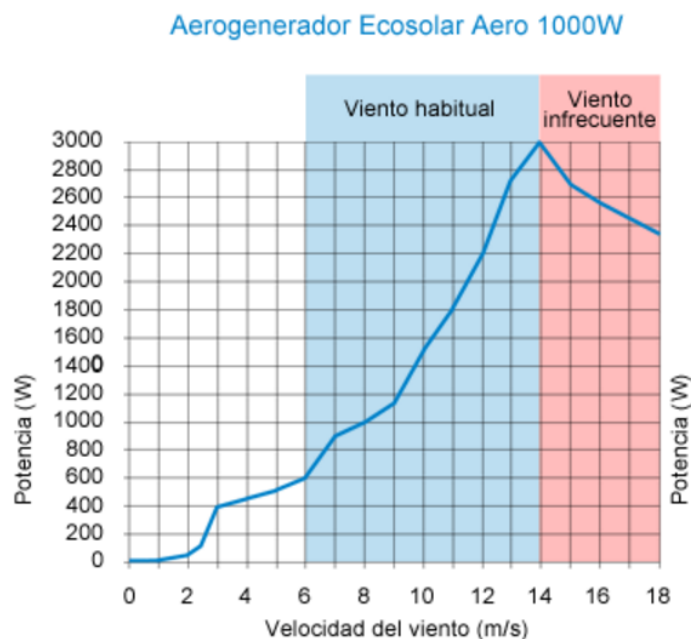


Figura 5.8. Corba de potència de l'aerogenerador Ecosolar Aero 1000W (Font: damiasolar.com)

viatges	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
4	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1
5	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
6	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
7	0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,2	0,3
8	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,3
9	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3
10	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,3	0,4
11	0,3	0,2	0,3	0,4	0,4	0,6	0,5	0,6	0,5	0,5	0,3	0,4
12	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4
13	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,7	0,6	0,7	0,6	0,6	0,4	0,5
14	0,3	0,3	0,3	0,5	0,6	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,4	0,5
15	0,4	0,3	0,4	0,6	0,6	0,8	0,7	0,8	0,7	0,7	0,5	0,6
16	0,4	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,5	0,6
17	0,4	0,4	0,4	0,6	0,7	0,9	0,8	0,9	0,8	0,8	0,5	0,6
18	0,4	0,4	0,4	0,7	0,7	0,9	0,8	0,9	0,9	0,9	0,5	0,7
19	0,5	0,4	0,4	0,7	0,8	1,0	0,8	1,0	0,9	0,9	0,6	0,7
20	0,5	0,4	0,5	0,8	0,8	1,1	0,9	1,0	1,0	1,0	0,6	0,7
21	0,5	0,4	0,5	0,8	0,9	1,1	0,9	1,1	1,0	1,0	0,6	0,8
22	0,5	0,5	0,5	0,8	0,9	1,2	1,0	1,2	1,1	1,1	0,7	0,8
23	0,6	0,5	0,5	0,9	0,9	1,2	1,0	1,2	1,1	1,1	0,7	0,9
24	0,6	0,5	0,6	0,9	1,0	1,3	1,1	1,3	1,2	1,2	0,7	0,9
25	0,6	0,5	0,6	0,9	1,0	1,3	1,1	1,3	1,2	1,2	0,8	0,9
26	0,6	0,5	0,6	1,0	1,1	1,4	1,2	1,4	1,3	1,3	0,8	1,0
27	0,7	0,6	0,6	1,0	1,1	1,4	1,2	1,4	1,3	1,3	0,8	1,0
28	0,7	0,6	0,7	1,1	1,1	1,5	1,2	1,5	1,4	1,4	0,9	1,0
29	0,7	0,6	0,7	1,1	1,2	1,5	1,3	1,5	1,4	1,4	0,9	1,1
30	0,7	0,6	0,7	1,1	1,2	1,6	1,3	1,6	1,5	1,5	0,9	1,1
31	0,8	0,7	0,7	1,2	1,3	1,6	1,4	1,6	1,5	1,5	0,9	1,2
32	0,8	0,7	0,8	1,2	1,3	1,7	1,4	1,7	1,6	1,6	1,0	1,2

Taula 5.11. Taula de valors d'unitats necessàries d'aerogeneradors model Ecosolar Aero 1000W per a diferents demandes i diferents mesos (Font: Elaboració pròpia)

El nou aerogenerador, com es pot observar a simple vista, aporta un grandíssim canvi a la situació, el preu de l'Ecosolar Aero 1000W (al voltant dels 1000 €) multiplica per 3 el del model Superwind 350 però si fem una bona comparació entre els dos, es a dir, fem el quocient de producció energètica de cadascun a cada mes veurem com de rendible és un en comparació amb l'altre.

Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
15,5325	12,9928	13,5259	27,5078	25,9306	49,6890	34,4422	57,1438	52,2113	37,1625	17,6671	22,4861

Taula 5.12. Taula de quocients entre valors de producció energètica dels dos aerogeneradors estudiats als diferents mesos de l'any (Font: Elaboració pròpia)

Si apliquem també l'important criteri del preu extraïem que per que el nou aerogenerador no fos rendible el quocient hauria de ser 3 o menys i això està ben lluny de ser així en tots els mesos. L'únic inconvenient a remarcar en la utilització de l'Ecosolar Aero 1000W és que la instal·lació d'un sol exemplar correspon a cobrir una alta demanda de viatges, i en cas de no tenir aquesta demanda el sistema pot quedar força sobredimensionat. A continuació es mostra les necessitats energètiques en viatges que es poden cobrir amb l'aportació d'un Ecosolar Aero 1000W.

Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
40	46	42	26	24	19	22	19	20	20	32	26

Taula 5.13. Taula amb el nombre de viatges diaris que es poden efectuar amb l'aportació d'un exemplar del model Ecosolar Aero 1000W als diferents mesos de l'any (Font: Elaboració pròpia)



Es pot observar que durant els tres primers mesos es sobrepassa el límit de possibles viatges a fer en un dia, és a dir que aquest exemplar d'aerogenerador, per aquest període de tres mesos mencionat, seria útil en el cas que l'usuari del sistema estigués interessat en alimentar un sistema amb més d'un dron.

Per a la resta de mesos, en cas de voler tal activitat del dron, aquest model novament proposat seria el més òptim.

Nova proposta de model de panell solar

En haver vist el gran augment d'eficiència en l'àmbit eòlic degut a la recerca d'una millora en la rendibilitat tant energètica com econòmica es procedeix a la recerca d'una millora referent al mode solar. En aquest cas és més directe, als panells solars s'indica justament la potència al màxim punt de treball, la potència amb la qual es dimensiona la instal·lació o sistema a desenvolupar, per tant cal buscar un panell fotovoltaic amb una potencia màxima alta i a un preu que compleixi una bona relació potència/preu i a ser possible de tecnologia monocristal·lina, característica que fa que la placa sigui més eficient i major qualitat.

El model que proposarem ara és el monocristal·lí de 250 W i 24V d'Eurosur.

<u>Especificaciones técnicas:</u>	
Potencia nominal Pmax.	250 WP
Tensión nominal U MPP	30,04 V
Corriente nominal IMPP	8.72A
Circuito abierto tensión U0	37,6 V
Corriente de cortocircuito ISC	8,21 A
Dimensiones L x W	1667 x 990 x 40 mm
Caja del marco Altura / con	40mm / 40mm
Peso	18Kg
Conectividad del módulo	Aproximadamente 900mm con conector MC4 macho/hembra
Color del marco	Anodizado plata
- Max system voltage: 1.000V	
- Test condition: AM1.5 - 1.000/m2 - 25°C	

Figura 5.9. Especificacions tècniques del mòdul solar monocristal·lí 250 W i 24V d'Eurosur
(Font: eurosur-solar.palbin.com)

Substituint els valors de voltatge i corrent de l'MPP al full de càlcul emprat anteriorment per al dimensionat amb la primera proposta de panell solar obtenim ràpidament un nou resultat. El resultat és el següent:

viatges	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
1	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
2	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,6
3	0,9	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
4	1,1	0,9	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,9	1,1	1,2
5	1,4	1,2	0,9	0,9	0,8	0,7	0,7	0,8	0,9	1,1	1,4	1,5
6	1,7	1,4	1,1	1,1	0,9	0,9	0,8	0,9	1,1	1,3	1,7	1,8
7	2	1,6	1,3	1,3	1,1	1,0	1,0	1,1	1,3	1,6	2,0	2,1
8	2,3	1,9	1,5	1,4	1,2	1,1	1,1	1,3	1,5	1,8	2,3	2,4
9	2,6	2,1	1,7	1,6	1,4	1,3	1,3	1,4	1,7	2,0	2,5	2,7
10	2,9	2,3	1,9	1,8	1,5	1,4	1,4	1,6	1,9	2,2	2,8	3,0
11	3,2	2,6	2,0	2,0	1,7	1,6	1,6	1,7	2,1	2,5	3,1	3,3
12	3,4	2,8	2,2	2,1	1,9	1,7	1,7	1,9	2,2	2,7	3,4	3,6
13	3,7	3,0	2,4	2,3	2,0	1,8	1,8	2,0	2,4	2,9	3,7	3,9
14	4,0	3,3	2,6	2,5	2,2	2,0	2,0	2,2	2,6	3,1	3,9	4,2
15	4,3	3,5	2,8	2,7	2,3	2,1	2,1	2,4	2,8	3,4	4,2	4,5
16	4,6	3,7	3,0	2,9	2,5	2,3	2,3	2,5	3,0	3,6	4,5	4,8
17	4,9	4,0	3,1	3,0	2,6	2,4	2,4	2,7	3,2	3,8	4,8	5,1
18	5,2	4,2	3,3	3,2	2,8	2,6	2,5	2,8	3,4	4,0	5,1	5,4
19	5,4	4,4	3,5	3,4	2,9	2,7	2,7	3,0	3,6	4,3	5,3	5,7
20	5,7	4,7	3,7	3,6	3,1	2,8	2,8	3,1	3,7	4,5	5,6	6,0
21	6,0	4,9	3,9	3,8	3,2	3,0	3,0	3,3	3,9	4,7	5,9	6,3
22	6,3	5,1	4,1	3,9	3,4	3,1	3,1	3,5	4,1	4,9	6,2	6,6
23	6,6	5,4	4,3	4,1	3,5	3,3	3,2	3,6	4,3	5,2	6,5	6,9
24	6,9	5,6	4,4	4,3	3,7	3,4	3,4	3,8	4,5	5,4	6,8	7,2
25	7,2	5,8	4,6	4,5	3,9	3,5	3,5	3,9	4,7	5,6	7,0	7,5
26	7,5	6,1	4,8	4,7	4,0	3,7	3,7	4,1	4,9	5,8	7,3	7,8
27	7,7	6,3	5,0	4,8	4,2	3,8	3,8	4,3	5,1	6,0	7,6	8,1
28	8,0	6,5	5,2	5,0	4,3	4,0	4,0	4,4	5,2	6,3	7,9	8,4
29	8,3	6,8	5,4	5,2	4,5	4,1	4,1	4,6	5,4	6,5	8,2	8,7
30	8,6	7,0	5,6	5,4	4,6	4,3	4,2	4,7	5,6	6,7	8,4	9,0
31	8,9	7,3	5,7	5,6	4,8	4,4	4,4	4,9	5,8	6,9	8,7	9,3
32	9,2	7,5	5,9	5,7	4,9	4,5	4,5	5,0	6,0	7,2	9,0	9,6

Taula 5.14. Taula de valors d'unitats necessàries de panells solars model Monocristal·lí 250W 24V d'Eurosur per a diferents demandes i diferents mesos (Font: Elaboració pròpia)

Podem comprovar, com era d'esperar, que aquest nou model emprat és més profitós i competeix millor amb l'aerogenerador de la nova proposta. Per comparar millor repetim el procés fet anteriorment per obtenir la taula 3.12. i fem el quocient d'ambdues produccions energètiques. Obtenim el següent:

Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
11,7607451	11,0737594	7,88976984	4,7279018	3,7722607	2,7013627	3,1856272	3,00602649	3,82043277	4,58819039	9,22869857	8,05187988

Taula 5.15. Taula de quocients entre valors de producció energètica de l'aerogenerador i el mòdul solar de les noves propostes als diferents mesos de l'any (Font: Elaboració pròpia)

Sabent que aquest model té un preu de 190 € a la pàgina web de l'empresa, s'extreu que el nou model de placa solar és el més rentable en termes de producció energètica / preu en els mesos que van des de l'abril a l'octubre, els mesos amb quocient inferior a 5 (relació entre preus).

Criteris i variabilitat del dimensionat

L'elecció de quin tipus de tecnologia triar, o el nombre d'exemplars que calen per alimentar el sistema, com s'ha dit des del principi, és una qüestió depenent de les necessitats energètiques i el moment d'aquestes. Si bé hem fixat l'emplaçament (Barcelona) i per tant hi ha unes dades de

radiació solar i vent romanents, queda concretar en cada cas quin és el temps durant el qual el sistema ha de funcionar i a quin ritme ha de fer-ho, això és una informació que ha de marcar el propi usuari. A partir d'aquí, amb l'eina creada només és qüestió de seleccionar el cas concret en el qual ens trobem i així comparar els càlculs obtinguts d'aquest procés en el qual només caldria introduir les especificacions tècniques dels components a utilitzar.

Com a exemple de sistema amb molta demanda podríem posar un en el qual es disposés de dos drons amb l'objectiu de tenir en marxa les operacions dutes a terme pels drons al menys un 50 % del total del temps diari aproximadament al llarg de tot l'any. En aquest cas la demanda correspon a un mínim de 48 viatges d'un quart d'hora aproximadament realitzats per ambdós drons. Com en aquest cas es vol utilitzar el sistema durant tot l'any, llavors és bona idea la combinació d'ambdues tecnologies, ja que la mitjana de mesos on el recurs eòlic és més escàs coincideix aproximadament amb els mesos amb millor radiació solar, d'aquesta manera es minimitza la diferencia de producció energètica entre mesos de major i menor producció.

Si es fa servir un aerogenerador Ecosolar Aero 1000W i 6 mòduls solars model Monocristal·lí 250W 24V d'Eurosur aquestes necessitats queden cobertes de manera apropiada.

Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
62,7	73,8	75,8	60,6	64,0	62,0	65,8	57,8	53,0	47,8	54,7	47,3

Taula 5.16. Taula amb nombre de viatges diaris possibles amb la combinació d'un aerogenerador i 6 mòduls solars (Font: Elaboració pròpia)

A causa de que el més car d'un sistema així són les bateries, en cas de ser un sistema crític en el qual la existència de dies en els quals no es facin els viatges establerts no sigui una opció caldria sobredimensionar i tenir una certa sobreproducció ja que les bateries tenen preus alts i seria més car l'emmagatzemament que un cert sobredimensionat. Normalment no es donaria aquesta situació.

5.3.2. Dimensionat per a un cas concret

Sistema tipus proposat

Per poder polir al màxim el dimensionat d'un sistema d'aquesta naturalesa, a nivell d'altres components com són els reguladors de càrrega, les bateries i el cablejat, necessitem primer concretar les dimensions a partir de la demanda energètica de cada cas. Degut a això es procedeix a proposar una demanda de viatges per, a partir d'aquí crear un model de sistema particular com a cas d'exemple per duu a terme el proposat.

Posem que un futur usuari té previst realitzar algun tipus de supervisió d'unes instal·lacions a un terreny extens on cal un vehicle aeri amb gran capacitat de moviment i agilitat com és un dron per realitzar aquesta feina. Imaginem també que aquest usuari vol que el dron supervisi la zona 1 cop cada 2 hores, cada dia i durant tot l'any.

Segons aquesta premissa inicial caldrà fer 12 viatges diaris, si anem a la taula 3.14. a la fila corresponent a 12 viatges, sabent que es voldrà fer servir el sistema tot l'any, hem de seleccionar el nombre de plaques del pitjor cas per assegurar que es cobreixen sempre les necessitats que en aquest cas és el Desembre i per tant corresponen 3,6 mòduls fotovoltaics, és a dir 4.

Dimensionat de les bateries

Comparant diversos tipus de bateries solars trobades a pàgines web de venda d'aquest tipus de productes, tant en qualitat com en relació capacitat/preu, s'ha seleccionat per al sistema una bateria de gel de 250 Ah i 12 V de la marca Ecosolar degut al seu bon preu i alta capacitat.

Les bateries de gel es componen d'un electròlit gelificat (d'aquí el seu nom) gràcies al qual mai pot haver-hi cap tipus de vessament si es bolqués la bateria per accident, com si podria ocórrer amb una bateria d'àcid-plom convencional. Gràcies a això, es poden posar en qualsevol posició, molt pràctic per a instal·lacions on hi hagi limitació d'espai. De la mateixa manera que les bateries AGM, les de gel vénen en un envàs segellat que no requereix de manteniment ja que el gas del seu interior es recombina evitant-se la pèrdua d'aigua. Degut a aquestes altes prestacions i avantatges respecte altres models de bateries solars aquestes són un dels tipus de bateria més utilitzats.

Una bateria de gel té una vida útil de 12 anys, superior a altres bateries usades (8-9 anys de les AGM i 4-5 anys de les monoblock) aconseguida gràcies al gruix de les seves plaques i de l'alta densitat del seu material actiu en forma de gel que permet obtenir un millor rendiment que en altres bateries solars, també ofereixen una millor resistència a la corrosió i un funcionament òptim amb el pas dels anys per aquest motiu. Són una bona inversió en cas de no voler realitzar un desemborsament econòmic tan gran com per posar bateries estacionàries (TOPZS, RPZS, ROPZS, OPZV ...) o per a mitjanes instal·lacions on no sigui necessari instal·lar bateries tan potents.

Permeten un elevat nombre de cicles de càrrega i descàrrega durant molt de temps, descàrregues profundes fins al 80% sense afectar la seva vida útil i tenen una autodescàrrega molt baixa. També tenen una bona tolerància a les altes i baixes temperatures ja que gràcies a la densitat de la seva electròlit, disposa d'una bona resistència a congelar.

En conclusió les bateries de gel són la millor opció on es necessiti obtenir la major durada i vida útil possible amb la millor relació qualitat-preu.

Per dimensionar les bateries cal aplicar l'anomenat a l'apartat del càlcul de pèrdues d'emmagatzematge, cal saber els dies d'autonomia del sistema, la profunditat de descàrrega dels acumuladors i l'eficiència de l'emmagatzematge. Es coneixen aquests paràmetres ja que han sigut establerts anteriorment per al càlcul de les necessitats energètiques.

Les plaques utilitzades tenen un voltatge nominal de 24 V i les bateries dels drons un voltatge nominal de 22,2 V, per tant es decideix que les bateries usades (12V) es connectaran en series de 2 per formar conjunts de 24 V i 250 Ah, ja que quant més propers són els voltatges amb que es treballa millor serà l'eficiència de conversió que efectuarà el regulador de càrrega mppt seleccionat posteriorment. A continuació es mostra el càlcul de les bateries del sistema d'emmagatzematge.

$$N_{bat,sist} = \frac{C_{bat,dron} \cdot V_{bat,dron} \cdot PD_{bat,dron} \cdot N_{bat,dron} \cdot D_{aut} \cdot N_{viatges}}{C_{bat,sist} \cdot V_{bat,sist} \cdot \eta_{em} \cdot P_{D,max}} \quad (\text{Eq. 13})$$

On:

$C_{bat,dron}$ és la capacitat nominal de les bateries que equipa el dron

$V_{bat,dron}$ és el voltatge nominal de les bateries que equipa el dron

$PD_{bat,dron}$ és la profunditat de descàrrega admissible per a les bateries que equipa el dron

$N_{bat,dron}$ és el nombre de bateries que equipa el dron

D_{aut} és el nombre de dies d'autonomia que volem pel sistema

$N_{viatges}$ és el nombre de viatges diaris que hem establert que farà el dron

$C_{bat,sist}$ és la capacitat nominal de les bateries que equipa el sistema

$V_{bat,sist}$ és el voltatge nominal de les bateries que equipa el sistema

η_{em} és l'eficiència en el procés d'emmagatzematge (1 – l'autodescàrrega diària)

$PD_{bat,sist}$ és la profunditat de descàrrega admissible per a les bateries que equipa el sistema

$$N_{bat,sist} = \frac{8 \cdot 22,2 \cdot 0,7 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 12}{250 \cdot 24 \cdot 0,95 \cdot 0,7} = 2,99 \simeq 3 \quad (\text{Eq. 13})$$

Obtenim com a resultat 6 bateries, 3 blocs de dos bateries en sèrie agrupats en paral·lel.

Dimensionat del regulador de càrrega

Primer de tot cal calcular les corrents màxims que hi circulen tant d'entrada com de sortida al regulador.

Càlcul del corrent d'entrada:

$$I_{entrada} = Impp \cdot Np \cdot CS \quad (\text{Eq. 14})$$

On:

$Impp$ és el corrent al màxim punt de potencia aportat per un panell fotovoltaic

Np és el nombre de panells que té el sistema

CS és un coeficient de seguretat

$$I_{entrada} = 8,72 \cdot 4 \cdot 1,15 = 40,12 \text{ A} \simeq 40 \text{ A} \quad (\text{Eq. 15})$$

Càlcul del corrent de sortida:

$$I_{sortida} = I_{càrrega,dron} \cdot N_{bat,dron} \quad (\text{Eq. 16})$$

$I_{càrrega,dron}$ és el corrent de càrrega de les bateries que equipa el dron en ampers

$N_{bat,dron}$ és el nombre de bateries que equipa el dron

$$I_{càrrega,dron} = \frac{C_{bat,dron} \cdot PD_{bat,dron}}{t_{càrrega}} \quad (\text{Eq. 17})$$

$C_{bat,dron}$ és la capacitat nominal de les bateries que equipa el dron en ampers hora

$PD_{bat,dron}$ és la profunditat de descàrrega admissible per a les bateries que equipa el dron en tant per 1

$t_{càrrega}$ és el temps de càrrega de la bateria en hores

$$I_{càrrega,dron} = \frac{8 \cdot 0,7}{0,5} = 11,2 \text{ A} \quad (\text{Eq. 18})$$

$$I_{sortida} = 11,2 \cdot 2 = 22,4 \text{ A} \quad (\text{Eq. 19})$$

Ara ja sabem quina corrent ha de suportar l'inversor, la major de les dues calculades, es a dir 40 A.

Un model de regulador idoni per aquest sistema veient les seves característiques el model Regulador Ecosolar MPPT 40A 12V/24V/48V amb pantalla. Com les plaques solars utilitzades són de 60 cèl·lules i tenen elevada potència és necessari utilitzar un regulador amb mppt ja que no es deu usar un de convencional, ja que es farien malbé les bateries i es reduiria la vida útil d'aquestes. Com a característiques principals té un algoritme mppt de control d'alta eficiència (99%), suporta fins a un voltatge de camp solar de 100 V, té tres fases de càrrega: ràpida, constant i de flotació i compta amb proteccions contra excés de temperatura, polaritat inversa, per curtcircuit i per sobrecàrrega. Té un bon preu a la pagina web Damiasolar (196 €).

Dimensionat de cablejat

La forma d'obtenir el gruix de cable necessari a cada tram del sistema és a través de la següent formula:

$$S_{cable} = \frac{2 \cdot L \cdot I}{\sigma \cdot U} \quad (\text{Eq. 20})$$

On:

L és la distància en metres entre el inici i el final del tram de cablejat

I és la intensitat en aquest tram

σ és la conductivitat elèctrica del material dels cables (s'usarà coure amb $\sigma = 55,6 \text{ m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$)

U és la caiguda de tensió permesa en el tram

Resultats:

Circuit	Vnom (V)	ΔV (%)	U (V)	L (m)	I (A)	S (mm2)	S norm. (mm2)
Panells-Regulador	24	3	0,72	5	40	9,99200639	10
Regulador-Bateries	24	0,7	0,168	2	22,4	9,59232614	10
Regulador-Bateries dron	24	3	0,72	2	22,4	2,23820943	2,5

Taula 5.17. Taula amb càlculs de secció de cable per a cada tram (Font: Elaboració pròpia)

6. Seguiment solar

En el moment l'obtenció de dades solars a l'apartat de càlcul del recurs solar, recordem que s'han buscat i obtingut dades amb seguiment solar de dos eixos, és a dir amb els panells fotovoltaics encarats en tot moment. Per aconseguir això és necessari incloure també dins del nostre conjunt un subsistema que s'encarregui de duu a terme aquesta labor.

El subsistema que s'encarrega d'aquesta part consistirà en un parell de servomotors controlats per un microcontrolador ARDUINO amb un algoritme de seguiment solar. Un servomotor s'encarrega de girar horitzontalment (eix de gir vertical) un pla o estructura en el qual es situen els panells solars per fer el seguiment de l'azimut i un altre verticalment (eix de gir horitzontal) el qual s'encarrega del seguiment de l'altura solar. A continuació s'explica la dinàmica, els càlculs necessaris per obtenir el punt on es troba el sol en cada moment i els possibles algoritmes.

6.1. Moviment Sol-Terra i obtenció de la trajectòria solar

Com és sabut la terra es mou al voltant del Sol amb dos moviments bàsics: La rotació i la translació. D'ambdós moviments cal saber el seu comportament detalladament per poder fer un seguiment solar precís.

La rotació, el moviment que efectua la Terra girant sobre l'eix terrestre, eix que passa per dos punts de la superfície terrestre anomenats pols, té dos períodes de gir diferenciat segons el punt de referència que es pren. Si prenem com a referència als estels, una volta completa dura 23 hores amb 56 minuts i 4,099 segons, aquest període es denomina dia sideral. Prenent com a referència al Sol, el mateix meridià contacta amb la recta que uneix els centres d'ambdós astres cada 24 hores, aquest període es anomena dia solar. En el termini de temps de les 24 hores la Terra ha avançat en la seva òrbita i ha de girar alguna cosa més que un dia sideral per completar un dia solar, per això hi ha aquests aproximadament 3 minuts i 56 segons de diferència entre ambdós períodes.

La translació, el moviment pel qual el planeta Terra gira al voltant del Sol té un lapse de temps de 365 dies i una mica menys de 6 hores i un recorregut en forma d'òrbita el·líptica. El nostre calendari té 365 dies sencers, cada any que passa aquest fet fa que el començament de l'any s'avenci i per això un de cada quatre anys és de traspàs i dura 366 dies, per corregir aquest avenç. S'anomena any tropical al lapse necessari perquè es repeteixin les estacions de l'any i són 365 dies, 5 hores, 48 minuts i 45 segons. La trajectòria el·líptica és de 930 milions de quilòmetres i la distància mitjana al Sol és d'aproximadament 150 milions de quilòmetres o el que s'anomena 1 U.A. (unitat astronòmica:

149.597.871 km) i per tant la velocitat mitjana de la terra al voltant del Sol és de 106.200 km / h (29,5 km / s).

El Sol es troba en un dels focus de l'el·lipse que descriu la trajectòria de la terra per això en els primers dies de gener s'aconsegueix la màxima proximitat al Sol (periheli) amb una distància de 147,5 milions de quilòmetres i en els primers dies de juliol s'aconsegueix la màxima llunyania (afeli) amb una distància de 152,6 milions de quilòmetres.

S'anomena eclíptica al pla pel qual es mou la terra al voltant del Sol, l'eix terrestre forma un angle d'uns $23,45^\circ$ respecte a la normal de l'eclíptica, a això se li anomena obliquïtat de l'eclíptica i és la responsable de l'existència d'estacions i variacions a les hores de llum del dia. Als pols, el que ocorre és que s'alternen llargs períodes de llum i foscor, com llargs dies i llargues nits.

Hi ha altres moviments de la terra els quals són negligibles o bé perquè són inapreciables en períodes curts (el canvi significatiu és dona durant un període molt llarg de temps) o per la imperceptibilitat que fa que sigui tan poc significatiu que no valgui la pena tenir-ho en compte. Són la precessió, la nutació i balanceig de Chandler.

La precessió dels equinoccis és un moviment lent i gradual que pateix l'eix de rotació de la terra que consisteix en un canvi d'orientació del mateix, la posició que indica l'eix es desplaça al voltant del pol de l'eclíptica, l'eix descriu un con i una revolució es completa cada 25.776 anys (50,290966 segons sexagesimals a l'any o aproximadament 1 grau cada 71,6 anys). És degut a la inclinació de l'eix de rotació i la força exercida sobre la protuberància equatorial de la Terra i l'aigua per la Lluna i el Sol.

La nutació és una oscil·lació periòdica del pol de la Terra al voltant de la seva posició mitjana prenent com a referència els estels, amb una velocitat de gir de nou segons d'arc cada 18,6 anys, en una volta completa de precessió la Terra haurà realitzat 1385 cops aquest moviment. És causat per les forces externes d'atracció gravitatòria entre la Lluna i el Sol amb la Terra.

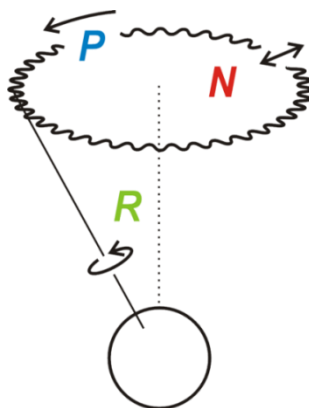


Figura 6.1. Representació esquemàtica de la rotació, precessió i nutació (Font: <http://cmapspublic2.ihmc.us>)

Per últim el balanceig de Chandler és una petita oscil·lació de l'eix de rotació de la Terra que afegeix 0,7 segons d'arc en un període de 433 dies a la precessió dels equinoccis. El motiu no es sap amb exactitud, hi ha diverses teories.

En definitiva només rotació i translació caldran tenir-se en compte per aconseguir la trajectòria solar des del punt de vista de la terra.

6.1.1. Declinació solar

La declinació solar és l'angle que forma la línia recta que uneix els centres de la Terra i el Sol amb el pla equatorial de la terra. Aquest és 0° als equinoccis i varia entre -23,45° i 23,45° dels solsticis.

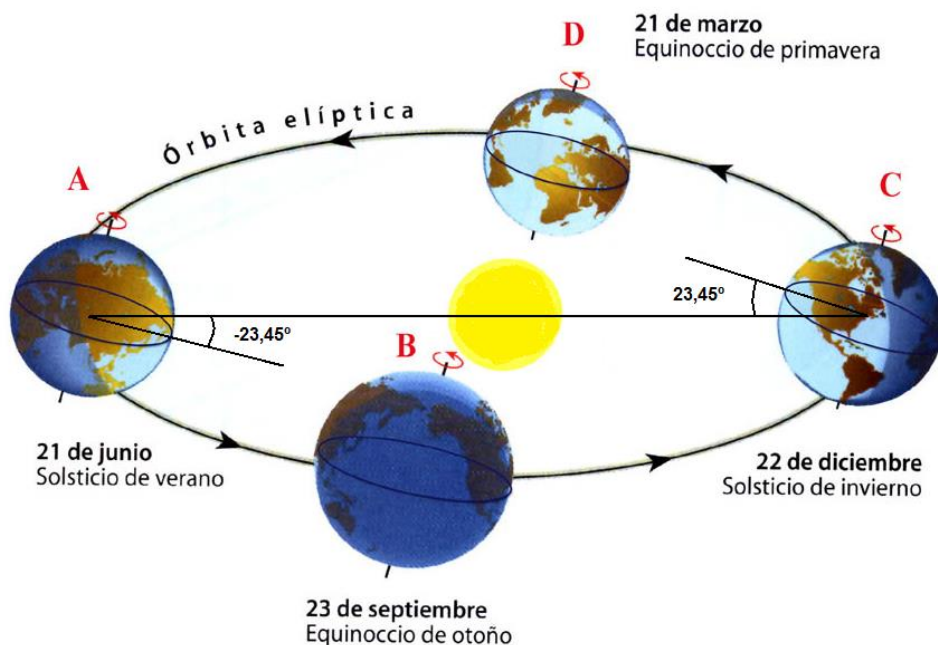


Figura 6.2. Declinació solar (Font: <http://4.bp.blogspot.com>)

Hi ha un parell de fórmules que ens permeten calcular la declinació segons el dia:

- Equació d'Spencer:

$$\delta = 0,006918 - 0,399912 \cdot \cos(\Gamma) + 0,070257 \cdot \sin(\Gamma) - 0,006758 \cdot \cos(2\Gamma) + 0,000907 \cdot \sin(2\Gamma) - 0,002697 \cdot \cos(3\Gamma) + 0,00148 \cdot \sin(3\Gamma) \text{ [rad]} \quad (\text{Eq. 21})$$

$$\text{Angle diari: } \Gamma = 2\pi \cdot \frac{\text{dia}-1}{365,2422} \text{ [rad]} \quad (\text{Eq. 22})$$

- Equació de cooper:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot (dia + 284)}{365}\right) [^\circ] \quad (\text{Eq. 23})$$

6.1.2. Moviment del sol relatiu a la Terra

Per definir el moviment del sol respecte un punt de la terra el primer és fixar el punt de referencia al centre de la terra. L'eix z es fa coincidir amb l'eix de rotació de la Terra i els eixos x i y es posicionen de manera que el pla YZ conté el punt de l'escorça terrestre en que ens centrem. Forçadament el pla XY correspon en aquest cas al pla equatorial.

Per localitzar un punt a la superfície terrestre és fan servir les seves coordenades esfèriques donades per la latitud i la longitud. La latitud és l'angle format entre la projecció al pla equatorial de la recta que passa pel centre de la terra i el punt en qüestió i la mateixa recta. La longitud és l'angle format pel pla que conté el meridià de Greenwich i el pla que conté el meridià del punt en qüestió.

El vector de posició solar (unitari) referenciat al centre de la terra, és el vector de la recta que uneix els centres de la Terra i el sol i es determina en funció del temps segons l'equació que segueix:

$$\vec{PS} = \sin(\Omega t) \cdot \cos(\delta) \cdot \vec{i} + \cos(\Omega t) \cdot \cos(\delta) \cdot \vec{j} + \sin(\delta) \cdot \vec{k} \quad (\text{Eq. 24})$$

En aquesta equació cal ser molt precisos per això a l'hora d'introduir la velocitat angular de gir de la terra (Ω) no considerarem que el seu valor és $2\pi/24$ rad/h o $2\pi/1440$ rad/min, sinó que considerem el període precís, és a dir les 23 hores amb 56 minuts i 4,099 i per tant obtenim que $\Omega = 0,00437526908313374$ rad/min o el que és el mateix $\Omega = 0,250684452697637$ °/min.

Per traslladar la referencia des de les coordenades anteriors (equatorials) a les anomenades horitzontals, és a dir amb l'origen situat al punt de la superfície d'interès i l'eix x passant pels punts cardinals Est i Oest, l'eix y pel Nord i el Sud (amb el positiu al Sud) i l'eix z és perpendicular a la superfície terrestre (orientat al zenit), cal tenir en compte el següent de les noves coordenades:

$$\vec{i}' = \vec{i} \quad (\text{Eq. 25})$$

$$\vec{j}' = \sin(\phi) \cdot \vec{j} - \cos(\phi) \cdot \vec{k} \quad (\text{Eq. 26})$$

$$\vec{k}' = \cos(\phi) \cdot \vec{j} + \sin(\phi) \cdot \vec{k} \quad (\text{Eq. 27})$$

Llavors la transformació queda com segueix:

$$\begin{aligned} \vec{PS}' = & \sin(\Omega t) \cdot \cos(\delta) \cdot \vec{i} + (\cos(\Omega t) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\phi) - \sin(\delta) \cdot \cos(\phi)) \cdot \vec{j} \\ & + (\cos(\Omega t) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\phi) + \sin(\delta) \cdot \sin(\phi)) \cdot \vec{k} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 28})$$

Tant aquesta equació com l'equació del càlcul de δ depenen del temps per tant ara ja és possible calcular les 3 components del vector que apunta al Sol sabent el temps. Com el que realment volem és crear un algoritme que calculi els dos angles que caracteritzen la posició del sol en el cel. Aquests dos angles són l'azimut (ψ) i l'altura solar (α). L'azimut és l'angle que formen la part positiva de l'eix de les y (orientada al Sud) i la projecció del vector solar en el pla XY. L'altura solar és l'angle que formen el vector solar i pla XY. Sabent això podem calcular-los:

$$\alpha = \arcsin(z) \quad (\text{Eq. 29})$$

$$\psi = \arcsin\left(\frac{x}{\cos(\alpha)}\right) \quad (\text{Eq. 30})$$

Per acabar de matissar cal mencionar que el temps $t=0$ correspon al migdia del primer dia de l'any.

6.2. Tria de servomotors

Cadascun dels quatre mòduls que es faran servir té un pes de 18 kg segons la fitxa tècnica (que es pot veure als annexos, tots plegats en l'estructura de suport ha de tenir una forma rectangular de 2 X 2 plaques (la forma geomètrica més compacta possible). L'estructura seria com la següent:

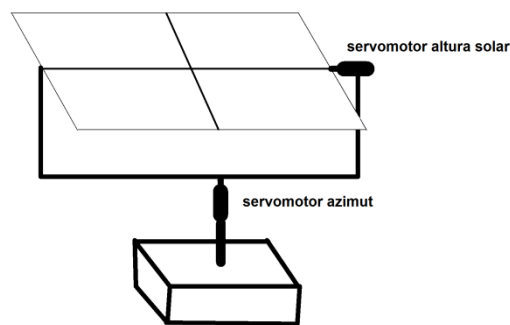


Figura 6.3. Representació esquemàtica de l'estructura de seguiment solar (Font: Elaboració pròpia)

Per seleccionar els servomotors hem de saber quin parell han d'exercir als eixos i es calcula amb la següent fórmula que és la segona llei de Newton aplicada a la rotació:

$$\Gamma = I \cdot \alpha \quad (\text{Eq. 31})$$

El parell és igual al moment d'inèrcia per l'acceleració angular i per tant hem de fixar una acceleració angular pertinent per trobar a través de la inèrcia el parell que necessitem.

El moment d'inèrcia del nostre conjunt de plaques per a un gir en l'eix horitzontal (el menor dels dos possibles) és:

$$I_h = \frac{2}{3} \cdot m \cdot L^2 = \frac{2}{3} \cdot (18 \cdot 4 + 20) \cdot 0,99^2 = 60,113 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (\text{Eq. 32})$$

On m és la massa i L la longitud del costat de la placa perpendicular a l'eix de gir.

La velocitat angular més lenta amb la qual canviarà l'altura solar són aproximadament una mica menys d'un grau per hora, per això es proposa que la velocitat angular que volem provocar sigui molt petita i fixem $1^\circ/\text{s}^2$, que equival a $\pi/360 \text{ rad/s}^2$.

$$\Gamma = 60,113 \cdot \frac{\pi}{360} = 0,5246 \text{ N} \cdot \text{m} = 52,46 \text{ N} \cdot \text{cm} = 5,347 \text{ kg} \cdot \text{cm} \quad (\text{Eq. 33})$$

No cal que el servomotor tingui aquest parell nominal exacte buscarem un amb parell semblant per ambdós servomotors. Per aquesta característica es selecciona el model de servomotor Servo Power HD 6001HB de BricoGeek amb parell de 6,7 Kg/cm. Aquest servomotor necessita una alimentació d'entre 4,8 i 6 V, l'ARDUINO amb el qual es controla necessita 5V. Vist aquestes característiques amb un petit convertidor que converteixi el voltatge de les bateries del sistema a 5V podran ser alimentats aquests components. Al muntar el sistema caldria encarar-ho cap al sud de la forma més precisa possible.



Figura 6.4. Servomotor Servo Power HD 6001HB de BricoGeek (Font: BricoGeek)

Cal dir que el preu dels servomotors, l'ARDUINO i el convertidor no arriben a sumar 50 euros, mentre que l'eficiència que guanya el sistema de seguiment amb dos eixos és d'un 40%. [6] 1,4 vegades el preu de les plaques, quantitat per produir la mateixa energia que amb dos eixos, s'aproxima a 300 euros en cas de que les plaques fossin divisibles, però a la realitat serien dues plaques més i aquesta xifra és de 380 euros. Podem apreciar un estalvi notori.

6.3. Algoritme

Hi ha diverses formes de plantejar com volem que sigui l'algoritme. Una forma és a través de la mesura de la llum mitjançant sensors lumínics, també és possible fer-ho maximitzant la potència mesurada amb un voltímetre i un amperímetre o una altra forma és a través del temps, mitjançant les fórmules i procediments mostrats a l'apartat 4.1. La darrera modalitat és la que s'emprarà en aquest sistema.

6.3.1. Seguiment solar amb sensors lumínics o potència aportada

En el cas d'usar sensors aquests es poden posar en diferents configuracions, es poden ficar 4 un a cada racó de l'estructura i fer un algoritme que mani fer una comparació entre la llum que arriba als dos sensors de la part dreta i els dos de la part esquerra i el mateix pel conjunt de la part superior i la inferior, en funció d'això es dona una ordre a cada servomotor per tal que girin cap al costat amb més llum fins arribar al punt on la radiació que arriba a tots 4 és la màxima.

També és possible ficar els sensors als punts mitjos de les arestes del rectangle que formen els mòduls i fer el mateix procés de comparació esquerra-dreta i dalt-baix.

Per últim, una tercera opció podria ser corregir el moviment si la llum del sensor o del conjunt de sensors en cas d'haver més d'un no és màxima, de forma que si el moviment fet pels servomotors ha disminuït la radiació rebuda, automàticament, canvia el sentit del moviment fins detectar que la radiació rebuda és màxima, és a dir que el servomotors s'aturaran a l'instant en que el seu moviment no faci incrementar la radiació rebuda. En aquest cas es pot usar un sol.

En cas de mesurar la potència l'algoritme treballaria de la mateixa manera que l'últim cas explicat, amb l'objectiu de trobar el punt encarat al qual el panell proporciona la màxima potència.

6.3.2. Seguiment solar de forma analítica

Mitjançant les fórmules de determinació de la posició del sol de l'apartat 4.1. en un algoritme només cal obtenir d'alguna manera el temps o l'instant de l'any en el qual es troba el sistema.

Una forma d'obtenir el temps és mitjançant només software descarregant una llibreria que es diu Time.h, aquesta llibreria permet saber la hora i data a cada moment però amb dos grans inconvenients. El primer és que en cas de tallar-se l'alimentació es perdria la configuració i caldria tornar a configurar-lo introduint l'hora i la data a partir de la qual comença a comptar. L'altre inconvenient és que la precisió no es molt bona i l'hora indicada es pot retardar amb el pas del temps.

L'altra forma d'obtenir el temps i la data amb ARDUINO és amb l'ús de un petit hardware que el complementa anomenat RTC (Real time Clock) que també disposa de la seva llibreria. Aquests dispositius són més precisos i poden alimentar-se alternativament, en cas de fallar l'alimentació principal, amb una font d'energia externa com pot ser una petita bateria, una pila o un supercondensador. El model que triem és un DS3231 el qual pot arribar a tenir, degut a canvis de temperatura, un desfàs de dos o tres minuts a l'any. Depenent del model d'ARDUINO que s'utilitzi la forma de connectar-lo canvia. En el sistema s'usarà un ARDUINO UNO llavors la connexió serà la següent: SDA (senyal de dades) amb el pin A4, SCL (senyal de rellotge) amb l'A5, GND amb GND i VCC amb 5V. [11]

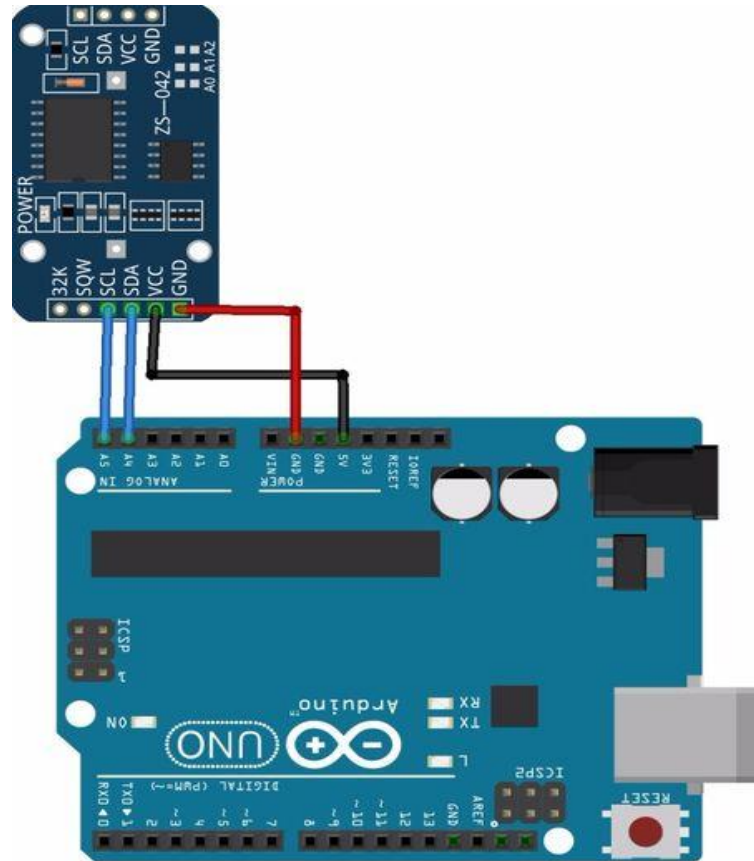


Figura 6.5. Connexió ARDUINO UNO – RTC DS3231(Font: FRITZING)

L'algoritme rebrà informació de data i hora i haurà de transformar aquesta informació a temps transcorregut des de l'inici de l'any (migdia del primer dia de l'any) i a partir d'aquí introduir aquesta informació a les fórmules que calcularan els dos angles en els que s'han de posicionar els servomotors. Cal tenir en compte algun detall com si l'any es de traspàs i per tant febrer te 29 dies o els canvis d'horari d'estiu (de 2:00 a 3:00 AM) i d'hivern (de 3:00 a 2:00 AM) per corregir el temps aplicable a les fórmules. Podeu trobar l'algoritme de control de servomotors amb comentaris explicatius del procés als annexos (Annex A).

7. Anàlisi de l'impacte ambiental

Avui dia un dels principals reptes que afronta la humanitat és el canvi climàtic, un problema que se sap greu i que per tant està en el punt de mira de gran part de la societat com a tema a solucionar. Una de les accions més directes per contribuir a la solució d'aquest problema és la utilització de fonts d'energia renovable per reduir les emissions de gasos d'efecte hivernacle. El principal responsable d'aquests gasos, com ja és ben sabut, és el Diòxid de carboni (CO_2) i és per això que ens centrarem en aquest per a realitzar aquest apartat.

En el moment del dimensionat s'ha triat una demanda energètica específica a cobrir, que són 12 viatges diaris i a partir d'aquí s'ha seleccionat el nombre de plaques mínim necessari per cobrir la demanda mínima proposada. Això comporta que el sistema serà capaç de produir més energia de la necessària per cobrir les necessitat energètiques en tots els mesos ja que pel cas més desfavorable es necessitaven 3,6 mòduls fotovoltaics, cosa que imposa la instal·lació de 4.

Com la possibilitat de producció es major que la del mínim establert els càlculs pel que respecta l'impacte ambiental es faran amb base a aquesta producció real.

Si calculem l'invers dels valors calculats amb el full de càlcul a la fila corresponent a un viatge, obtenim la quantitat de viatges diaris de dron possibles per cada mòdul corresponent a cada mes. Tenim 4 mòduls produint cada dia.

S'estima que la vida útil de les són 10 anys, gracies al regulador de càrrega que allarga la vida útil de les bateries es podria arribar a 12 anys segons les característiques tècniques d'una bateria de gel com la que s'empraria al sistema desenvolupat. És també cert que s'estima la pèrdua d'eficiència anual dels actuals mòduls fotovoltaics cristal·lins en un 0,5% i això significaria una vida útil de 40 anys, al menys produint amb una eficiència per sobre del 80%, clar que aquestes prediccions es fan amb base en unes proves amb condicions idònies, si contemplem que poden ser possibles al llarg de la vida del sistema forts vents, precipitacions i pedregades podem predir que el més habitual es que la vida útil d'un panell serà menor a la de major potencial. Els fabricants normalment garanteixen 25 anys de bon funcionament. Si es volgués fer servir el sistema durant tant de temps seria necessari un canvi de bateries a meitat del transcurs, com és un fet poc probable limitem el temps dels càlculs d'impacte ambiental a 12 anys. [12] [13]

	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny
Viatges / (mòdul·dia)	3,5	4,3	5,4	5,6	6,5	7,0
Viatges / dia	14,0	17,1	21,6	22,3	25,9	28,2
Viatges / mes	424,6	520,2	657,1	679,3	788,6	857,5

	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Decembre
Viatges / (mòdul·dia)	7,1	6,4	5,3	4,5	3,6	3,3
Viatges / dia	28,3	25,4	21,3	17,9	14,2	13,3
Viatges / mes	862,1	772,8	649,1	543,2	432,4	404,6

Taula 7.1. Taula amb Viatges per mòdul i dia, per dia i per mes per a cada mes (Font: Elaboració pròpia)

Si fem el sumatori de l'última fila s'obté el total de viatges en un any, el resultat és 7591,4. Durant 12 anys de funcionament serien 91096,8. Si volem calcular l'energia elèctrica a la que equival s'ha de fer el producte per l'energia que suposa una càrrega de les bateries del dron.

$$E = 91096,8 \cdot 22,2 \text{ V} \cdot 8 \text{ Ah} \cdot 0,7 \cdot 2 = 22650296,22 \text{ Wh} = 22.650,3 \text{ kWh} \quad (\text{Eq. 34})$$

El mix energètic espanyol l'any 2015 segons Red Elèctrica Española va ser en següent:



Figura 7.1. Mix energètic espanyol 2015(Font: REE)

Segons el Ministerio de Industria, Energía y Turismo del Govern d'Espanya les emissions de CO₂ per kWh elèctric al punt de consum per a les tecnologies principals d'emissió segons el mix energètic són les següents:

- Central de ciclo combinat: 0,41 kg CO₂/kWh

- Central tèrmica de carbó: 1,09 kg CO₂/kWh
- Central de cogeneració de motor de combustió interna alternatiu: 0,45 kg CO₂/kWh; Central de cogeneració de turbina de gas: 0,42 kg CO₂/kWh; Central de cogeneració de turbina de vapor: 0,48 kg CO₂/kWh; Central de cogeneració de cicle combinat :0,42 kg CO₂/kWh.

Creuant els percentatges del mix energètic de les principals tecnologies que emeten CO₂ a l'atmosfera amb les emissions corresponents a cadascuna obtindrem una estimació ponderada de la mitjana d'emissions per unitat d'energia al punt de consum i així calcular el CO₂ que s'ha evitat emetre amb el sistema desenvolupat.

$$\frac{\text{emissions}}{\text{energia}} = 0,1 \cdot 0,41 + 0,203 \cdot 1,09 + 0,106 \cdot \left(\frac{0,45+0,42 \cdot 2+0,48}{4} \right) = 0,309175 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kWh}} \quad (\text{Eq. 35})$$

Si aquest factor li apliquem al consum elèctric calculat prèviament obtenim el següent estalvi d'emissions de CO₂:

$$\text{estalvi emissions} = 22.650,3 \cdot 0,309175 = 7002,9 \text{ kg CO}_2 \quad (\text{Eq. 36})$$

S'estima que les emissions de CO₂ conseqüència de la producció de mòduls solars amb tecnologia de silici monocristal·lí és d'uns 45gCO₂/kWh.

$$\text{emissions} = 22.650,3 \cdot 0,045 = 1019,26 \text{ kg CO}_2 \quad (\text{Eq. 36})$$

Vist l'estalvi i l'emissió de CO₂ s'extreu un resultat de 5984 kg de CO₂ i aproximadament 2 anys de temps de compensació de l'emissió en la fabricació de mòduls solars. [14] [15]

No s'han tingut en compte les emissions en la fabricació del regulador de càrrega i el cablejat. Pel que fa les bateries, posat que són un requisit que serveix per a assegurar el subministrament en tot moment, caldria partir abans de quina premissa s'imposa per valorar quanta necessitat de no interrupció d'aquest hi ha a cada cas per poder tenir en compte un impacte real d'aquestes i en el cas proposat s'ha triat un criteri concret que no té perquè ser únic.

8. Pressupost

8.1. Cost dels components i materials

Component	Empresa	Unitats	€/unitat	Preu (€)
Mòdul monocristal·lí 24V 250W	Eurosur	4	190	760
Regulador Ecosolar MPPT 40A 12V/24V/48V	Ecosolar	1	196	196
Bateria de Gel Ecosolar 250Ah C100 12V	Ecosolar	6	343	2058
Servomotor Servo Power HD 6001HB	BricoGeeck	2	12,9	25,8
ARDUINO UNO ORIGINAL amb ATMEGA328	ARDUINO	1	19,45	19,45
Mòdul ZS-042 RTC DS3231 AT24C32	Tiendatec	1	2,15	2,15
Convertidor DC-DC 12V-5V	Tiendatec	1	2,3	2,3
1 m de Cable 10 mm ²	Topsolar	14	3,0	42
2 m de Cable 2,5 mm ²	Topsolar	4	1,4	5,6
Suports i estructura	-	1	20	20
Total				3131,3

Taula 8.1. Taula de pressupost de components i materials (Font: Elaboració pròpia)

8.2. Altres costos

Realment el sistema proposat i desenvolupat no té un fi comercial com a objectiu que s'hagi plantejant en un principi, ja que no hi ha un nínxol de mercat de persones que demandin carregar drons a zones aïllades o no connectades a la xarxa tal com per poder veure en la comercialització una oportunitat idònia de negoci, però podria tenir-ne algun.

Seria perfectament plausible que una empresa que es dediqui a vendre productes i components per a instal·lacions amb energia renovable oferís aquest sistema com un pack més, junt amb el carregador balancejat de bateries de dron i la plataforma de estacionament, que moltes vegades ofereixen. És en aquest cas on a més dels costos de material podria afegir-se un servei de transport més muntatge del sistema. Un preu raonable podria ser oferir 2 € per kilòmetre de distància per al transport i uns 100 € pel muntatge sense imprevistos i el servei de càlcul de dimensionament per a cada cas.

Per a un usuari, a una llunyania de mitja distància i pel cas de demanda energètica proposat en aquest treball, l'obtenció del sistema a seu punt sortiria aproximadament per uns 3330 €.

Conclusions

Durant el transcurs del temps d'elaboració d'aquest projecte de dimensionat i desenvolupament d'un sistema de plataforma de recàrrega de drons amb renovables han anat sorgint dubtes, els quals s'han anat resolent i solucionant fins arribar a obtenir el resultat desitjat, un senzill sistema de càlcul per a un dimensionament energètic òptim amb bona eficiència per a la càrrega autònoma dels drons que s'havien especificat.

Primerament hi havia el problema de la incertesa de les dimensions de la demanda energètica, cosa que normalment és la base per al començament del dimensionament energètic d'una instal·lació o sistema renovable. Com no anava a ser un dimensionat per a un cas concret es va optar per enfocar d'una manera més global i arribar a una conclusió sobre en quin rang de possibilitats diferents podríem trobar-nos en relació a aquest tema i com anava a indicar-se. És per aquest motiu que s'ha encarat d'una manera poc concreta o oberta al principi.

Pel que fa la selecció de components generadors, inicialment hi havia una premissa per la qual s'anaven a utilitzar per al dimensionat uns models concrets proposats, és per això que en començar a veure primers resultats la satisfacció no era bona, ni al moment de valorar si la quantitat de panells solars era raonables com també a la part eòlica. Després de diverses comprovacions i una ràpida recerca es va arribar a la conclusió de que optar per incloure seguiment solar amb dos eixos era bona idea. Efectivament va ser així i és en aquest moment on es sospita de que els aerogeneradors emprats són poc eficients a les velocitats de vent que es donen a la localitat tractada (Barcelona), d'aquí la idea final de buscar un aerogenerador millor i després un altre model de panell solar que hi competís.

El tema de les bateries o acumuladors del sistema és important ja que suposen la major part del preu total d'una instal·lació o sistema d'aquest tipus i és important saber quina és l'autonomia més petita que s'està disposat a assumir, ja que una reducció de l'emmagatzematge resulta en una reducció considerable del cost i de l'impacte, però no cal perdre de vista com de crític és cada cas.

Com es va optar per l'opció de dimensionar la part solar mitjançant seguiment de dos eixos ha calgut també una recerca referent a la programació de servomotors. Inicialment es va poder observar que navegant per la xarxa hi ha diverses propostes molt vàlides mitjançant sensors de llum, però es va acabar creient més fiable i aportadora l'opció de programar el seguiment solar de forma analítica amb els coneixements que es tenen sobre els moviments dels astres. També va semblar bona idea per temes pràctics i de robustesa el fet de no emprar sensors que puguin ser lleument fets malbé pel temporal o simplement ser coberts ja sigui per pols o quelcom improbable però possible. Els coneixements d'ARDUINO inicials eren nuls però gràcies a la gran quantitat d'ajuda i informació a la

xarxa he pogut desenvolupar un petit programa que duu a terme els objectius de control dels servomotors que s'havien proposat.

En general aquest projecte ha estat enriquidor i interessant, m'ha aportat nous coneixements i és un altre petit pas per continuar formant-me, cosa que agraeixo.

Bibliografia

- [1] M. Tudel, G. Massip, J.F. Roca. (2011) ***“Energía solar fotovoltaica” Col·lecció quadern pràctic 4.*** Institut Català d’energia, Generalitat de Catalunya, Barcelona, Catalunya.
- [2] H. Martínez. ***“Sistemas de Energía Solar Fotovoltaica”*** (Apunts Docència). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Catalunya.
- [3] Revaliente Revuelta, J. (2017) ***“Disseny electrònic d’un carregador de bateries balancejat per a drons”***. (Treball final de grau). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Catalunya.
- [4] H. Martínez. ***“Energía Eólica ”*** (Apunts Docència). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Catalunya.
- [5] W.F. Álvarez Castañeda, L.A. Martínez Tejada, AC Alvarado Fajardo. (2013) ***“Aplicación de la ecuación de weibull para determinar potencial eólico en tunja-colombia”*** . Universidad Santo Tomas Colombia, Facultad de Ingeniería Electrónica y Universidad Libre de Colombia, Facultad de Ingeniería.
- [6] E.Turrillas Solabre i J. Aginaga García. (2014) ***“Estudio comparativo de la eficiencia energética en seguidores solares”***. Universidad Pública de Navarra.
- [7] ***“Las ventajas de las baterías de gel”***. Recuperat 20/09/2017 Disponible a:
https://www.damiasolar.com/actualidad/blog/articulos-sobre-la-energia-solar-y-sus-componentes/ventajas-baterias-de-gel_1
- [8] ***“Piranómetro”***. Recuperat 23 -5-2017. Disponible a: wikipedia.org/wiki/Piranómetro
- [9] ***“La célula fotovoltaica”***. Recuperat 23 -5-2017. Disponible a:
enerpoint.es/photovoltaic_technology_2.php
- [10] ***“Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)”***. Recuperat 15 -3-2017. Disponible a:
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=en&map=europe>
- [11] ***“Reloj con Arduino, cómo controlar los tiempos con un RTC”*** (2017). Recuperat 10 -8-2017.
Disponible a: <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/reloj-con-arduino-rtc/>
- [12] ***“Vida útil de los paneles solares”***. (2015). Recuperat 2 -9-2017. Disponible a:
<https://electronicadepatio.blogspot.com.es/2015/06/vida-util-de-los-paneles-solares.html>

[13] C. Clay." **Vida útil del panel solar**". (2013). Recuperat 2 -9-2017. Disponible a:
http://www.ehowenespanol.com/vida-util-del-panel-solar-info_202333/

[14] "**impacto ambiental de la energía fotovoltaica, paneles solares**". Recuperat 1 -9-2017.
Disponible a: <https://prezi.com/zy8ic5awdb7c/impacto-ambiental-de-la-energia-fotovoltaica-paneles-solares/?webgl=0>

[15] "**Emisiones de CO2 en la producción de paneles fotovoltaicos**". Recuperat 1 -9-2017.
Disponible a: <https://www.scribd.com/document/38737728/6-Emisiones-de-CO2-en-la-produccion-de-paneles-fotovoltaicos>

Annex A

Algoritme de seguiment solar en ARDUINO

```
#include <Wire.h>

#include <RTC.h> /* Llibreria de rellotge RTC */

#include <Servo.h> /* Llibreria Servomotors */

RTC rtc(DST_ON); /* Inici RTC */

Servo servoh; /* Servo horitzontal (azimut) */

Servo servov; /* Servo vertical (altura) */

double t, tmes; /* Variables "temps" i "dies transcorreguts segons el mes" */

double x, y, z; /* les 3 components del vector solar */

double omega = 0.00437526908313374; /* velocitat angular de la terra en rad/min */

double chi = 0.722479043863053; /* Latiud de Barcelona en radians */

double delta, altura, azimut, anguloh, angulov; /* declinació i altura solar i azimut en rad i ° */

int bisiesto; /* variable que indica si estem a un any de trespàs */

int canvih; /* variable que detecta canvi d'hora */

double angulohant; /* On es guarda l'últim angle del servoh */

double angulovant; /**/

double difh; /**/

double difv; /**/

double hora; /**/

double horaant; /**/
```

```
double difhora;/**/

void setup() /* S'assignen pins digitals(PWM)als servos i s'inicialitzen a 0 */
{

    servoh.attach(9);

    servoh.write(0);

    servov.attach(10);

    servov.write(0);

}

void loop()

{

    Data d = rtc.getData(); /* d guarda data i hora*/

    if (d.year % 4 == 0) /*Si l'any és de traspàs es suma 1 a tmes*/

    {

        bisiesto = 1;

    }

    else

    {

        bisiesto = 0;

    }

    hora = d.hour*24*3600 + d.minutes*60 + d.seconds; /*hores, minuts i segons a segons*/

    difhora = hora - horaant; /*diferencia entre hora actual i l'ultima guardada*/

    /*Quan hi ha el canvi d'hora de 2 a 3 la diferencia (abs) és major de 59 min (en segons)
```

llavors es corregeix restant 1 hora a "t"; de 3 a 2 el mateix però sumant 1 hora */

```
if (difhora > 3540)
```

```
{
```

```
    canvih = canvih - 1;
```

```
}
```

```
if (difhora < (-3540))
```

```
{
```

```
    canvih = canvih + 1;
```

```
}
```

```
/*Com no tots els mesos tenen el mateix nombre de dies cal
```

```
especificar quants dies han passat si estem a un mes concret*/
```

```
if (d.month = 1)
```

```
{
```

```
    tmes = 0;
```

```
}
```

```
else if (d.month = 2)
```

```
{
```

```
    tmes = 31;
```

```
}
```

```
else if (d.month = 3)
```

```
{
```

```
    tmes = 31 + 28 + bisiesto;
```



```
}  
  
else if (d.month = 4)  
  
{  
  
    tmes = 31 + 28 + bisiestos + 31;  
  
}  
  
else if (d.month = 5)  
  
{  
  
    tmes = 31 + 28 + bisiestos + 31 + 30;  
  
}  
  
else if (d.month = 6)  
  
{  
  
    tmes = 31 + 28 + bisiestos + 31 + 30 + 31;  
  
}  
  
else if (d.month = 7)  
  
{  
  
    tmes = 31 + 28 + bisiestos + 31 + 30 + 31 + 30;  
  
}  
  
else if (d.month = 8)  
  
{  
  
    tmes = 31 + 28 + bisiestos + 31 + 30 + 31 + 30 + 31;  
  
}  
  
else if (d.month = 9)
```



```
{  
  
    tmes = 31 + 28 + bisiesto + 31 + 30 + 31 + 30 + 31 + 31;  
  
}  
  
else if (d.month = 10)  
  
{  
  
    tmes = 31 + 28 + bisiesto + 31 + 30 + 31 + 30 + 31 + 31 + 30;  
  
}  
  
else if (d.month = 11)  
  
{  
  
    tmes = 31 + 28 + bisiesto + 31 + 30 + 31 + 30 + 31 + 31 + 30 + 31;  
  
}  
  
else if (d.month = 12)  
  
{  
  
    tmes = 31 + 28 + bisiesto + 31 + 30 + 31 + 30 + 31 + 31 + 30 + 31 + 30;  
  
}  
  
/*Traducció de l'instant de l'any en que estem a segons*/  
  
t = d.seconds + d.minutes * 60 + (d.hour24h-12+canvih) * 60 * 60 +  
  
(d.day - 1) * 24 * 60 * 60 + tmes * 24 * 60 * 60;  
  
/*Càlcul de la declinació solar i les components del vector solar*/  
  
delta = 23.45 * sin(2 * 3.14159265358979323846 * (t / 1440 + 284) / 365);  
  
x = sin(omega * t) * cos(delta);  
  
y = cos(omega * t) * cos(delta) * sin(chi) - sin(delta) * cos(chi);
```

```

z = cos(omega * t) * cos(delta) * cos(chi) + sin(delta) * sin(chi);

/*Càlcul d'altura solar i azimuth en radians i graus*/

altura = acos(z);

azimut = asin(x / cos(altura));

anguloh = azimut * 180 / 3.14159265358979323846;

angulov = altura * 180 / 3.14159265358979323846;

/*Càlcul de diferència d'agles actuals de posició solar amb angles dels servos*/

difh = abs (angulohant-anguloh);

difv = abs (angulovant-angulov);

/*Només es transmetrà ordre de moviment als servos quan l'altura
solar sigui positiva (dia) i la diferencia d'angle >= 0.5º, en cas
de ser així es guarda el valor d'angle per a la següent comparació */

if ((angulov >= 0)&&(difv >= 0.5))
{
    servov.write(angulov);

    angulovant = angulov;
}

if ((angulov >= 0)&&(difh >= 0.5))
{
    servoh.write(anguloh);

    angulohant = anguloh;
}

```

*/*Es guarda el valor de l'hora a la variable d'hora anterior i s'atura el programa 2 segons */*

horaant = hora;

delay (2000);

}

Annex B

Fitxes tècniques, dades de components i recurs solar

- 1 - Panell Solar SW150 de Solar World
- 2 - Panell Solar 250 W d'Eurosur
- 3 - Aerogenerador 350 W de Superwind
- 4 - Aerogenerador 1000 W d'Ecosolar i test soroll
- 5 - Regulador de Càrrega d'Ecosolar
- 6 - Bateria 250 Ah d'Ecosolar
- 7 - Dades Solars Anuals Barcelona